





Thayla Bervian Roratto

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR SOLAR HÍBRIDO  
OPERANDO A VÁCUO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

Coorientadores: Prof. Dr. Bruno A. M. Carciofi

Dr. Ricardo Lemos Monteiro

Florianópolis  
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Roratto, Thayla Bervian  
Desenvolvimento de um secador solar híbrido  
operando a vácuo / Thayla Bervian Roratto ;  
orientador, João Borges Laurindo, coorientador,  
Bruno Augusto Mattar Carciofi, coorientador,  
Ricardo Lemos Monteiro, 2019.  
125 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis,  
2019.

Inclui referências.

1. Engenharia de Alimentos. 2. Desidratação de  
alimentos. 3. Secagem solar híbrida. 4.  
Sustentabilidade. I. Borges Laurindo, João. II.  
Mattar Carciofi, Bruno Augusto. III. Lemos  
Monteiro, Ricardo IV. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Alimentos. V. Título.

# “DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR SOLAR HÍBRIDO OPERANDO A VÁCUO”

Por

**Thayla Bervian Roratto**

Dissertação julgada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Alimentos**, área de Concentração de **Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina.



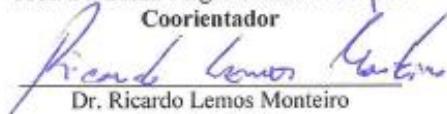
Prof. Dr. João Borges Laurindo

**Orientador**



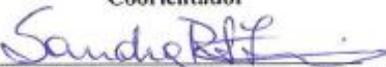
Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi

**Coorientador**



Dr. Ricardo Lemos Monteiro

**Coorientador**



Profa. Dra. Sandra Regina Salvador Ferreira

**Coordenadora**

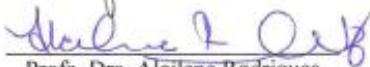
**Banca Examinadora:**



Prof. Dr. João Borges Laurindo



Prof. Dr. Samuel Luna de Abreu



Profa. Dra. Alcilene Rôdrigues

Monteiro Fritz

Florianópolis, 07 de março de 2019.



*Este trabalho é dedicado  
à minha família, em especial aos meus pais*



## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ana e Ronaldo, pelo exemplo de caráter, pela dedicação, pela educação, pelo apoio emocional, pelo amor dedicado. Além disso, obrigada por acreditarem, confiarem e apoiarem as minhas escolhas e mudanças!

Aos meus irmãos, Erica e Ariel, pela amizade e cumplicidade, pela ajuda, por dividir comigo suas experiências, pelo incentivo durante todos esses anos e em especial a minha irmã por ser meu apoio em Florianópolis.

Ao meu namorado, Marlon, pelo seu amor, incentivo e motivação. Obrigada por sua paciência, compreensão e pelo companheirismo em tempo integral.

Aos meus orientadores, João Laurindo, Bruno Carciofi e Ricardo Monteiro, pela orientação, confiança, paciência e ensinamentos oferecidos que foram essenciais para a concretização deste projeto e para minha formação. Obrigada por me inspirarem neste universo da pesquisa! Muito obrigada, Ricardo, pela amizade construída ao longo desse período e pelo apoio e ajuda imprescindíveis em várias etapas dessa jornada!

Ao pessoal do NUMA, da UFSC, por todo serviço prestado e contribuições na construção do equipamento.

Aos alunos de iniciação científica que contribuíram com o desenvolvimento deste projeto, em especial ao Anderson, que esteve presente desde o início.

A todos os colegas e amigos do PROFI pelas ajudas, ensinamentos e conhecimentos compartilhados. Além dos momentos de descontração e risadas que tornaram esse período mais leve. Em especial, obrigada à Manu, Ana, Aline, Denise e Jaque pelas conversas, conselhos e apoio nos momentos não tão tranquilos e nos mais alegres também!

Ao Thiago e João, do Departamento de Engenharia Mecânica, pelos trabalhos de simulação e projeto desenvolvidos.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.



*“Se uma ideia não parece absurda no início, então, não  
há esperança nenhuma para ela.”  
Albert Einstein*



## RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de frutas, mas processa apenas uma parte de sua produção. Frutas e hortaliças têm uma vida útil curta, o que provoca elevada perdas pós-colheita, e a desidratação é uma alternativa viável para diminuir os desperdícios. Porém, os processos tradicionais de secagem usam temperaturas elevadas e consomem muita energia, que oneram a produção e elevam os preços dos produtos desidratados. Além disso, o uso de combustíveis fósseis como fonte de energia provoca a emissão de gás carbônico para a atmosfera, associando a secagem a um processo com elevada emissão de carbono. A energia solar é uma fonte de energia abundante e sustentável, que não emite gases causadores do efeito estufa. No entanto, o uso direto dessa forma de energia permite pouco controle das condições de secagem. O presente estudo teve como objetivo desenvolver um secador de alimentos a vácuo, utilizando energia solar térmica acumulada na forma de água quente, permitindo o controle das condições de secagem. Foi empregada a secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, utilizando a condução como forma de transferência de calor (*conductive multi-flash drying KMF*) para produzir bananas desidratadas e crocantes. Foram utilizados coletores solares de tubo evacuado e um reservatório térmico com resistência elétrica para aquecimento da água do sistema até 90 °C. Neste equipamento, utilizado na região de Florianópolis-SC, foi possível desidratar de maneira homogênea 4 kg de de banana prata em 4 horas, utilizando apoio elétrico quando necessário. Três diferentes taxas de descompressão do sistema foram estudadas. Os produtos resultantes possuem alta porosidade (acima de 60%), baixo teor de umidade (menor que 0,02 g g<sup>-1</sup>) e de atividade de água (menor que 0,25). As amostras secas apresentaram estrutura expandida com poros largos, que resultaram em curvas de força-penetração e acústicas irregulares, características de produtos crocantes. Em alguns experimentos de secagem, a resistência elétrica de apoio foi desligada no início do processo. Nesses casos, houve redução da temperatura da água para 80 °C, apesar da alta radiação solar no período. Em 4 h de secagem, o produto final apresentou umidade de 0,039 g g<sup>-1</sup> (bs) e atividade de água igual a 0,285. O sistema de secagem permite a produção de bananas desidratadas de qualidade, crocantes, podendo ser usado em pequenas propriedades para produção de alimentos desidratados.

**Palavras-chave:** Secagem. Energia solar. Sustentabilidade.



## ABSTRACT

Brazil is one of the world's largest producers of fruit, but only part of its production is processed. Fruits and vegetables have a short shelf life and drying is a viable alternative to reduce food waste. However, traditional drying processes consume a lot of energy, which increase the production and the products costs. Besides, the use of fossil fuels as a source of energy causes the emission of carbon dioxide into the atmosphere, associating drying with a high carbon footprint. Solar energy is an abundant and sustainable source of energy that does not emit greenhouse gases. However, the direct use of this form of energy does not allow control of the drying conditions. The present study aimed to develop a vacuum food dryer, which uses solar thermal energy accumulated in form of hot water, allowing the control of the drying conditions. The drying process that was used to produce dried-and-crisp bananas was the conductive multi-flash drying (KMFD). Solar collectors with evacuated tubes and a thermal reservoir with electrical resistance were installed to heat the water used in the system up to 90 °C. In this equipment, used in the region of Florianópolis-SC, it was possible to homogeneously dehydrate 4 kg of raw material in 4 hours, using electric support when needed. Three different decompression rates were studied. The resulting products presented high porosity (above 60%), low moisture content (less than 0.02 g g<sup>-1</sup>) and water activity (less than 0.25). The dried samples presented an expanded structure with large pores, resulting in irregular mechanical and acoustic curves with numerous peaks, characteristic of crisp products. In some drying experiments, the electrical resistance was switched off at the beginning of the process. In these cases, there was a reduction of water temperature to 80 °C, despite the high solar radiation in the period. The final product presented moisture of 0.039 g g<sup>-1</sup> (bs) and water activity equal to 0.285 in 4 h of drying. The drying system has a great potential for the production of dried and crisp bananas and can be incorporated into family agriculture, increasing the income and productivity of rural workers, improving their living conditions.

**Keywords:** Drying. Solar energy. Sustainability.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Curvas típicas de secagem.....	43
<b>Figura 2.2</b> - Representação esquemática do mecanismo de <i>puffing</i> . ....	44
<b>Figura 2.3</b> - Evaporação e resfriamento durante a aplicação de um pulso de vácuo. ....	46
<b>Figura 2.4</b> – Mapa da irradiação global diária – média anual. ....	47
<b>Figura 2.5</b> – Mapa da irradiação global diária – médias mensais. ....	48
<b>Figura 2.6</b> - Classificação dos secadores solares.....	51
<b>Figura 2.7</b> - Princípio da secagem solar direta. Em que: $q_{in}$ = energia solar incidente ( $W/m^2$ ); $q_{lw}$ = ondas longas de perda de calor ( $W/m^2$ ); $q_r$ = perda de calor devido à reflexão ( $W/m^2$ ); $q_c, e$ = perda convectiva e evaporativa devido ao movimento do vento ( $W/m^2$ ); $q_s$ = perda de calor para a superfície ( $W/m^2$ ); $q_{dr}$ = calor absorvido para secagem ( $W/m^2$ ); $q_L$ = perda total de calor ( $W/m^2$ ) .....	52
<b>Figura 2.8</b> - Sistema de secagem solar indireta por convecção natural.	52
<b>Figura 3.1</b> - Vista lateral do equipamento multiuso de secagem de alimentos. (1) Coletor solar de tubo evacuado; (2) Reservatório de água com apoio elétrico (“boiler”); (3) Câmaras de secagem; (4) Tanque pulmão de vácuo; (5) Condensador; (6) Coluna sílica gel – <i>trapping</i> ; (7) Bomba de vácuo.; (8) Bombas de circulação de água; (9) Tanque de água com isolamento térmico. ....	58
<b>Figura 3.2</b> – Coletores solares de tubo evacuado utilizados no secador <i>Zero-Carbon-Vacuum Food Dryer</i> . ....	59
<b>Figura 3.3</b> – Representação do sentido de circulação da água no sistema de secagem desenvolvido. Em que $T_{TE}$ é a temperatura da água no tanque; $T_{TS}$ é a temperatura da água na saída do tanque; $T_{RM}$ é a temperatura da água medida no meio do reservatório térmico; $T_{RF}$ é a temperatura da água no fundo do reservatório térmico e $T_{CS}$ é a temperatura da água no coletor solar. ....	60
<b>Figura 3.4</b> – Resultado da simulação realizada no <i>software SolidWorks</i> para verificar a resistência dos materiais que compõe a câmara de secagem durante a aplicação de vácuo. ....	61
<b>Figura 3.5</b> – Secador <i>Zero-Carbon-Vacuum Food Dryer</i> desenvolvido no PROFI. ....	62
<b>Figura 3.6</b> - Distribuição das fatias de banana no secador. a) numeração dos quadrantes do secador; b) indicação dos quadrantes avaliados na secagem ( $\square$ ) KMFD ( $7,6 \text{ mbar s}^{-1}$ ) e ( $\circ$ ) KMFD ( $10,3 \text{ mbar s}^{-1}$ ). ....	66
<b>Figura 3.7</b> - Equipamento utilizado para a análise instrumental acústico-mecânica das amostras de banana desidratada. ....	72

<b>Figura 4.1</b> – Evolução temporal da radiação (- -), da temperatura da água no coletor (—) e da temperatura da água no interior do tanque (—) no período das 8h às 18h.....	73
<b>Figura 4.2</b> – Evolução temporal da radiação (- -), da temperatura da água no coletor (—) e da temperatura da água no interior do tanque (—) no dia 22/01/2019 no período das 8h às 18h, sem experimento de secagem..	75
<b>Figura 4.3</b> – Curvas de secagem média com desvio padrão das amostras de banana desidratadas por KMFD com diferentes taxas de descompressão. (◇) KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> ) e (○) KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> ). .....	76
<b>Figura 4.4</b> – Valores médios de umidade (g g <sup>-1</sup> bs) encontrados em cada quadrante das câmaras de secagem. Quadrantes destacados foram pesados o longo do processo. a) KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> ); b) KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> ). .....	77
<b>Figura 4.5</b> – Curvas de secagem obtidas em diferentes quadrantes do secador. a) KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> ) e b) KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> ). Os dados experimentais foram representados por pontos e a taxa de secagem durante o período da taxa de secagem constante foi representada por uma linha reta. ....	79
<b>Figura 4.6</b> – Evolução temporal da temperatura do interior das amostras (—) e da pressão (---) por a) KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> ) e b) KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> ). .....	80
<b>Figura 4.7</b> – Evolução da temperatura do interior das amostras (—) e da pressão (---) do sistema ao longo das secagens a) KMFDVD (180 min) e b) KMFDVD (210 min). .....	82
<b>Figura 4.8</b> – Perfil de variação da pressão <i>versus</i> tempo para as diferentes taxas de descompressão avaliadas. (—) KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> ); (—) KMFDVD (9,8 mbar s <sup>-1</sup> ); (—) KMFDVD (19,9 mbar s <sup>-1</sup> ). .....	84
<b>Figura 4.9</b> – Perfil representativo da evolução temporal da temperatura do interior das amostras (—) e da pressão (---) para o processo KMFDVD 9,8 mbar s <sup>-1</sup> . .....	85
<b>Figura 4.10</b> – Evolução temporal da temperatura do interior das amostras de banana (—) e da pressão (---) desidratadas por KMFDVD_SOLAR. ....	86
<b>Figura 4.11</b> – Evolução temporal da radiação (- -), da temperatura da água no coletor (—) e da temperatura da água no interior do tanque (—) durante e após a secagem KMFDVD_SOLAR.....	87
<b>Figura 4.12</b> – Imagens das fraturas das amostras de banana desidratada obtidas por a) MEV (aumento de x30) e b) microscopia ótica. ....	91

<b>Figura 4.13</b> – Imagens das superfícies das amostras de banana desidratada obtidas por a) MEV (aumento de x50); b) microscopia ótica e c) fotografia. ....	92
<b>Figura 4.14</b> – Gráficos representativos da oscilação da força em função da deformação dos testes de penetração das amostras de banana desidratadas por diferentes métodos de secagem. Linha superior: Dados de força-deformação (○) e ajuste não-paramétrico (—); Linha inferior: curvas dos resíduos.....	94
<b>Figura 4.15-</b> Evolução da Força aplicada (—) e nível de Pressão Sonoro (SPL) (—) versus o tempo de penetração das amostras: a) KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> ); b) KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> ); c) KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> ); d) KMFDVD (9,8 mbar s <sup>-1</sup> ); e) KMFDVD (19,9 mbar s <sup>-1</sup> ). ....	97
<b>Figura A.1</b> – Evolução temporal da radiação solar média (--), temperatura da água no interior do coletor solar (—) e temperatura da água no interior do tanque (—) durante os experimentos de secagem. a) KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> ); b) KMFDVD (9,8 mbar s <sup>-1</sup> ).....	115
<b>Figura A.2</b> – Evolução temporal da radiação solar média (--), temperatura da água no interior do coletor solar (—) e temperatura da água no interior do tanque (—) durante diferentes dias de janeiro. a) Dia 14/01/19; b) Dia 15/01/2019; c) Dia 17/01/2019; d) Dia 18/01/2019. ....	116
<b>Figura C.1</b> – Evolução temporal da temperatura do interior das amostras (—) e da pressão (---) por a) KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> ) e b) KMFDVD (19,9 mbar s <sup>-1</sup> ). ....	119
<b>Figura D.1</b> – Segunda replicata das curvas de oscilação da força em função da deformação. Linha superior: Dados de força-deformação (○) e ajuste não-paramétrico (—); Linha inferior: curvas dos resíduos. ....	120
<b>Figura D.2</b> – Terceira replicata das curvas de oscilação da força em função da deformação. Linha superior: Dados de força-deformação (○) e ajuste não-paramétrico (—); Linha inferior: curvas dos resíduos. ....	121
<b>Figura E.1</b> – Segunda replicata. a) KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> ); b) KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> ); c) KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> ); d) KMFDVD (9,8 mbar s <sup>-1</sup> ); e) KMFDVD (19,9 mbar s <sup>-1</sup> ). ....	122
<b>Figura E.2</b> – Terceira replicata. a) KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> ); b) KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> ); c) KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> ); d) KMFDVD (9,8 mbar s <sup>-1</sup> ); e) KMFDVD (19,9 mbar s <sup>-1</sup> ). ....	123



## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 2.1</b> - Produtos comumente processados a partir da banana.....	40
<b>Quadro 2.2</b> - Estado da arte sobre o desenvolvimento de secadores solares híbridos.....	54



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4.1</b> – Dados da temperatura da água medida em diferentes partes do sistema, temperatura ambiente e radiação solar coletados no dia 22/01/2019 no período das 8h às 18h.....	75
<b>Tabela 4.2</b> – Teor de umidade e atividade de água para bananas desidratadas obtidas por KMFDVD em diferentes tempos de processo. ....	81
<b>Tabela 4.3</b> – Taxas de descompressão obtidas para cada configuração do sistema de secagem. ....	83
<b>Tabela 4.4</b> - Teor de umidade final ( $X_{bs}$ ) e atividade de água ( $a_w$ final) das bananas desidratadas utilizando diferentes taxas de descompressão.....	85
<b>Tabela 4.5</b> - Teor de umidade e atividade de água das amostras acondicionadas em UR = 24,6% .....	88
<b>Tabela 4.6</b> - Porosidade e massa específica aparente das bananas secas utilizando diferentes taxas de descompressão. ....	89
<b>Tabela 4.7</b> - Valores médios e desvios padrões dos parâmetros obtidos nos testes acústico-mecânico, para amostras secas pelos diferentes processos de secagem.....	98
<b>Tabela A.1</b> – Dados da temperatura da água medida em diferentes partes do sistema, temperatura ambiente e radiação solar nos diferentes dias avaliados.....	117



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA – Análise de variância  
AOAC – *Association of Official Analytical Chemists*  
CIRAM – Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina  
CMFD – *Convective multi-flash drying*  
EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina  
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
FAO – *Food and Agricultural Organization*  
KMFD – *Conductive multi-flash drying*  
KMFDVD – *Conductive multi-flash drying* com 1 pulso de vácuo  
KMFDVD\_SOLAR – *Conductive multi-flash drying* sem apoio elétrico  
LCME – Laboratório Central de Microscopia Eletrônica  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
MFD – *Multi-flash drying*  
MWMFD – *Microwave multi-flash drying*  
PROFI – Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$a_w$	Atividade de água	-
$c_p$	Calor específico	$\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$
$dX/dt$	Taxa de secagem	-
$m_{H_2O}$	Massa da água	g
$m_p$	Massa inicial do produto	kg
$m_s$	Massa da amostra	g
$m_{ss}$	Massa de sólidos secos	kg
$P$	Pressão	mbar
$SPL$	Nível de Pressão Sonoro	dB
$SPL_{10}$	Média do nível de pressão sonora dos dez maiores picos acústicos	dB
$SPL_{máx}$	Média do valor de pressão sonora do pico acústico máximo	dB
SST	Sólidos solúveis totais	°Brix
$t$	Tempo	min
$T$	Temperatura	°C
$UR$	Umidade relativa	$\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$
$V_{ap}$	Volume aparente	$\text{cm}^3$
$V_r$	Volume real	$\text{cm}^3$
$X_{bs}$	Umidade em base seca	$\text{g g}^{-1}$
$X_{bu}$	Umidade em base úmida.	$\text{g g}^{-1}$
$\Delta H_v$	Entalpia específica de vaporização da água	$\text{J/kg}$
$\Delta m_w$	Perda de massa	kg
$\Delta T$	Variação da temperatura	°C
$\varepsilon$	Porosidade	-
$\rho$	Massa específica	$\text{g cm}^{-3}$
$\rho_{ap}$	Massa específica aparente	$\text{g cm}^{-3}$



## SUMÁRIO

<b>DIAGRAMA CONCEITUAL DA DISSERTAÇÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>35</b>
1.1 OBJETIVOS .....	37
1.1.1 Objetivo geral.....	37
1.1.2 Objetivos específicos .....	37
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>39</b>
2.1 BANANA.....	39
2.1.1 Processamento da banana .....	39
2.2 DESIDRATAÇÃO DE ALIMENTOS .....	41
2.2.1 Secagem convectiva.....	41
2.2.2 Secagem a vácuo.....	43
2.2.3 Liofilização.....	44
2.2.4 <i>Puff Drying</i> .....	44
2.2.5 Múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo ( <i>Multi-flash drying - MFD</i> ).....	45
2.3 ENERGIA SOLAR.....	46
2.3.1 Sistema fotovoltaico .....	49
2.3.2 Concentrador solar térmico .....	49
2.3.3 Coletor solar térmico .....	49
2.4 ENERGIA SOLAR NA DESIDRATAÇÃO DE ALIMENTOS.....	50
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>57</b>
3.1 SISTEMA DE SECAGEM SOLAR .....	57
3.1.1 Operação de secagem.....	63
3.2 DESEMPENHO DO COLETOR SOLAR DE TUBO EVACUADO .....	63
3.3 EXPERIMENTOS DE SECAGEM.....	64
3.3.1 Avaliação do secador .....	64
3.3.2 Secagem KMFD com aplicação de um pulso de vácuo .....	67

3.3.3	Secagem sem apoio elétrico contínuo .....	67
3.4	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DO PRODUTO FINAL .....	67
3.4.1	Teor de umidade e atividade de água.....	68
3.4.2	Volume aparente e massa específica aparente .....	68
3.4.3	Volume real .....	69
3.4.4	Porosidade .....	70
3.4.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	70
3.4.6	Estereoscópio Óptico .....	70
3.4.7	Propriedades mecânicas.....	70
3.4.8	Determinação simultânea das propriedades acústicas e mecânicas.....	71
3.4.9	Análise estatística.....	72
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>73</b>
4.1	DESEMPENHO DO COLETOR SOLAR DE TUBO EVACUADO.....	73
4.2	SECAGEM .....	76
4.2.1	Avaliação da secagem .....	76
4.2.2	Avaliação da taxa de descompressão.....	83
4.2.3	Secagem sem apoio elétrico contínuo .....	86
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DESIDRATADAS.....	88
4.3.1	Massa específica aparente, porosidade e microestrutura .....	88
4.3.2	Propriedades mecânicas.....	93
4.3.3	Propriedades acústico-mecânicas.....	95
5	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>99</b>
	<b>SUGESTÕES DE MELHORIA DO EQUIPAMENTO .....</b>	<b>101</b>
	<b>SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO.....</b>	<b>103</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE A – Evolução da radiação solar média, temperatura da água no interior do coletor solar e do tanque de água .....</b>	<b>115</b>

<b>APÊNDICE B</b> – Caracterização físico-química das amostras de banana prata <i>in natura</i> utilizada em cada processo de secagem.....	118
<b>APÊNDICE C</b> - Evolução temporal da temperatura do interior das amostras e da pressão do sistema durante as secagens.....	119
<b>APÊNDICE D</b> – Gráficos representativos da oscilação da força em função da deformação dos testes de penetração das amostras de banana desidratadas por diferentes métodos de secagem. ....	120
<b>APÊNDICE E</b> – Evolução da força aplicada (—) e nível de pressão sonora (spl) (—) versus o tempo de penetração das amostras .....	122
<b>APÊNDICE F</b> – Valores médios e desvios padrões dos parâmetros obtidos nos testes acústico-mecânico, para amostras secas pelos diferentes processos de secagem, para a análise estatística $p \leq 0,1$ .....	124



## DIAGRAMA CONCEITUAL DA DISSERTAÇÃO

### DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR DE ALIMENTOS A VÁCUO SEM EMISSÃO DE CARBONO

#### Por que?

- Frutas e hortaliças têm uma vida útil curta e perdas elevadas. A secagem é uma alternativa para aumentar a vida útil e agregar valor às matérias-primas agropecuárias.
- O processo de secagem tem uma grande demanda de energia térmica que normalmente é suprida com o uso de combustíveis-fósseis, que libera gás-carbônico na atmosfera

#### O que já existe

- Secagem convectiva: altas temperaturas resultam em degradação térmica, alterações de cor, degradação de nutrientes e encolhimento das frutas
- Secagem à vácuo: adequada para produtos termo sensíveis, porém não impede o encolhimento
- Liofilização: degradação térmica desprezível e resulta em frutas crocantes, mas com longos tempos de secagem, alto consumo de energia e custos elevados
- Secagem solar: método barato e tradicional, fonte de energia renovável, longos tempos de processo, exposição ao ambiente e ao ataque de insetos e pequenos animais
- Ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (*Multi-flash Drying – MFD*): frutas desidratadas crocantes com alta porosidade, baixo teor de umidade e baixa atividade de água em tempos de secagem reduzidos.

#### Contribuição do presente trabalho

- Adaptação da tecnologia MFD utilizando energia solar térmica: uso de uma fonte de energia limpa sem emissão de carbono
- Geração de conhecimento e tecnologia para a agricultura familiar



## 1 INTRODUÇÃO

A segurança alimentar e nutricional é um grande desafio global, que depende da redução de perdas e do fornecimento de alimentos frescos e processados que sejam seguros, acessíveis e nutritivos para todas as pessoas (AUGUSTIN et al, 2016; PORAT et al., 2016). Portanto, é essencial a redução do desperdício de alimentos em toda a cadeia produtiva, através de melhorias das técnicas de preservação, com aumento da vida útil dos produtos (AUGUSTIN et al, 2016).

A desidratação é um processo muito utilizado como técnica de preservação, pois reduz o teor de umidade e a atividade de água dos alimentos, o que reduz as velocidades de crescimento dos microrganismos e das reações químicas e enzimáticas (GEANKOPLIS, 1998). Consequentemente, a secagem prolonga a vida útil e agrega valor às frutas e hortaliças, além de reduzir os custos de armazenamento e transporte (RATTI, 2001; FELLOWS, 2000; ALIBAS, 2007).

A secagem de alimentos pode ser realizada por diferentes processos, como secagem solar, secagem convectiva, secagem a vácuo e liofilização. Porém, durante o processamento, podem ocorrer mudanças indesejáveis nas características sensoriais e nutricionais do alimento. A liofilização reduz as mudanças indesejáveis, mas possui elevados custos de investimento e de operação. No entanto, têm-se estudado métodos alternativos de desidratação que reduzem as alterações indesejáveis durante a secagem e resultam em produtos crocantes, com propriedades nutricionais e sensoriais atrativas. O processo denominado *multi-flash drying* (MDF) tem sido reportado como uma boa alternativa para produção de bananas desidratadas com textura crocante e em curtos tempos de secagem (ZOTARELLI et al, 2012; PORCIUNCULA et al, 2016; MONTEIRO et al, 2016; ANDREANI, 2018). Portanto, escolha do melhor método de secagem e das condições de processo depende das características desejadas para o produto desidratado e também das características do alimento antes do processamento.

A maioria das operações utilizadas na indústria de alimentos consome consideráveis quantidades de energia. As operações de secagem não fogem à regra, o que onera a produção e encarece o produto desidratado. Além disso, o uso de combustíveis fósseis usado no aquecimento do ar de secagem causa a emissão de gás carbônico para a atmosfera, associando esse processo a uma elevada pegada de carbono (BELESSIOTIS e DELYANNIS, 2011; PIRASTEH, 2014; AUGUSTIN, 2016; MOTEVALI e KOLOOR, 2017). Sendo assim, torna-se necessário

identificar meios mais eficientes de utilização da energia e de alternativas sustentáveis que promovam menor impacto ambiental.

A secagem solar tem sido usada por séculos na desidratação de produtos agrícolas. Entre as vantagens da secagem solar estão o baixo custo e seu caráter abundante e não poluente (PIRASTEH, 2014; BELESSIOTIS e DELYANNIS, 2011; MOTEVALI e KOLOOR, 2017). Os secadores solares podem ser classificados como diretos (a radiação solar incide diretamente sobre o produto), indiretos (a radiação solar aquece o ar de secagem) ou híbridos (utilização de uma fonte de energia auxiliar). No entanto, a secagem solar direta é muito dependente das condições climáticas e não há controle sobre as condições de secagem e qualidade do produto. Um secador solar híbrido utiliza, além da radiação solar, uma fonte de energia auxiliar, como biomassa ou energia elétrica, para compensar as flutuações climáticas, possibilitando o controle sobre as condições de processamento.

A agricultura de pequeno porte e a agricultura de grande porte atuam de maneira complementar no desenvolvimento rural brasileiro. As grandes propriedades rurais utilizam tecnologias de ponta, desenvolvidas por empresas com grandes centros de pesquisa e desenvolvimento. Em contrapartida, também é necessário investir em tecnologias de conservação e processamento dos produtos oriundos das pequenas propriedades (KALKMANN, 2013).

Portanto, sistemas de secagem solar híbrido são uma alternativa promissora e sustentável para reduzir as perdas pós-colheita e viabilizar a produção de frutas desidratadas em pequena ou média escalas de produção. Deste modo, pode-se agregar valor à matéria-prima agropecuária e contribuir para o aumento de renda e produtividade da agricultura familiar (TIWARI, 2016; PIRASTEH, 2014; BELESSIOTIS e DELYANNIS, 2011; MOTEVALI e KOLOOR, 2017).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um secador de alimentos a vácuo, com baixa emissão de carbono, para obtenção de frutas e hortaliças desidratadas crocantes.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolver uma unidade piloto de secagem solar a vácuo híbrida com coletores solares de tubo evacuado (aquecimento de água), para desidratar alimentos utilizando o processo *Multi-flash Drying – MFD*.
- b) Avaliar o desempenho do coletor solar de tubos evacuados;
- c) Avaliar a possibilidade de produção de banana crocante e com baixa umidade utilizando o secador desenvolvido;
- d) Analisar a influência da taxa de descompressão na secagem de fatias de banana;
- e) Avaliar as propriedades físico-químicas da banana desidratada submetida às diferentes condições de secagem.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BANANA

A banana é uma das frutas mais consumidas no Brasil, sendo a bananeira um dos principais cultivos agrícolas, tanto em área plantada, como em volume produzido e valor da produção (CEPLAC, 2001).

Segundo dados da FAO (2018), os maiores produtores de banana são a Índia, com aproximadamente 29 milhões de toneladas produzidas anualmente entre 2010 e 2015, e a China, com 11 milhões de toneladas produzidas anualmente no mesmo período. O Brasil aparece como o quarto maior produtor mundial de banana, ao lado do Equador, com uma média de produção de 7 milhões de toneladas.

No Brasil, a bananeira é cultivada em todos os estados, desde o litoral até o interior. Entretanto, fatores climáticos, como temperatura e regime de chuvas, impõem limites à cultura, fazendo com que ela se concentre nos Estados da Bahia, São Paulo, Santa Catarina, Pará, e Minas Gerais (FASOLIN, 2007). O estado de Santa Catarina ocupa a quarta posição na produção nacional de banana, e a produção concentra-se nas regiões norte, sul e vale do Itajaí (EPAGRI/CEPA, 2018).

As bananas Prata (subgrupo Prata) e Nanicão, mais conhecida como Caturra, (subgrupo Cavendish) pertencem ao gênero *Musa* e são as mais produzidas no país. A cultivar Prata é utilizada unicamente no mercado interno e a Caturra é destinada principalmente para a exportação.

Devido ao seu baixo custo e alto valor nutritivo, a banana é um constituinte importante na alimentação da população de baixa renda, tendo em vista que uma única banana supre cerca de um quarto da quantidade diária de vitamina C recomendada para crianças (EMBRAPA, 2006). A banana é rica em carboidratos e energia (calorias), apresentando ainda vários outros nutrientes importantes, como vitaminas e sais minerais. As principais vitaminas presentes na banana são as vitaminas A, C e complexo B (B1, B2 e niacina) (CHAMP, 2001). As principais proteínas presentes são a albumina e a globulina, porém em pequenas quantidades, e predominam os aminoácidos asparagina, glutamina e histidina (CHAMP, 2001).

#### 2.1.1 Processamento da banana

Praticamente toda a produção de banana é consumida *in natura* e apenas uma pequena parte é processada. Nos países e regiões menos desenvolvidos, o cultivo da banana desempenha um papel econômico e

social relevante, atuando na fixação da mão-de-obra rural, gerando postos de trabalho no campo e nas cidades, contribuindo para o desenvolvimento regional (FASOLIN, 2007).

De maneira geral, poucos agricultores se dedicam ao beneficiamento da banana, que fica a cargo de terceiros. Porém, alguns produtos, como banana-passa e doce de banana são exemplos de produtos com maior valor agregado, em comparação à fruta *in natura*, que podem ser produzidos pelos próprios agricultores (SEBRAE, 2008). Alguns produtos comumente processados a partir da banana estão listados no Quadro 2.1.

**Quadro 2.1** - Produtos comumente processados a partir da banana.

<b>Produto</b>	<b>Descrição</b>
Purê	Resulta do esmagamento da fruta, seguido de um tratamento para conservação. Conforme o tratamento utilizado, o purê obtido será acidificado, congelado ou asséptico.
Néctar	Consiste na mistura do purê de banana com outros ingredientes (açúcar, um ácido orgânico e pectina, por ex.) para elaboração de uma bebida à base de banana. Passa pelas seguintes etapas de processamento: homogeneização, desaeração, tratamento térmico (ou não térmico) e acondicionamento em embalagem.
Banana em calda	Este produto pode ser obtido a partir da fruta descascada inteira ou em pedaços. A banana e o xarope são acondicionados em latas de alumínio ou potes de vidro, passam por um tratamento térmico e são armazenados.
Doce em massa ou “bananada”	O purê de banana é misturado ao açúcar, ao ácido orgânico e à pectina e em seguida é concentrado em tacho aberto ou a vácuo. A bananada também é conhecida como mariola, bala de banana ou banana cristalizada.
Banana-passa	É o produto obtido por processo de secagem da banana madura inteira, em metades ou em fatias (rodela).

Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2006).

Além dos produtos listados no quadro acima, é possível produzir bananas desidratadas e crocantes através de diferentes processos. Dentre eles, Monteiro et al. (2016) cita os processos de fritura, liofilização e alguns métodos alternativos, como o *puff-drying* e a secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.

## 2.2 DESIDRATAÇÃO DE ALIMENTOS

Frutas e hortaliças têm vida útil curta, apresentando perdas elevadas (30-40% nos países em desenvolvimento), quando são usadas técnicas inadequadas de colheita, pós-colheita e armazenamento (JAYARAMAN e GUPTA, 2014). Dentre as estratégias utilizadas para a conservação, aumento da vida útil e agregação de valor de alimentos tem-se a secagem (RATTI, 2001; FELLOWS, 2000).

A secagem é uma das operações unitárias mais utilizadas para a conservação de alimentos. Consiste em um processo no qual a água é removida de um produto para reduzir sua atividade de água e inibir ou diminuir o crescimento de microrganismos deteriorantes, bem como diminuir a velocidade das reações químicas. Além do aumento da vida útil, com a remoção da água, tem-se a diminuição da massa e do volume do alimento, o que garante economia e praticidade no seu armazenamento e transporte (VEGA- MERCADO et al, 2001, TOREZAN, 2005).

O processo de secagem pode provocar mudanças nas características sensoriais e nutricionais de um alimento. Assim, o projeto de um equipamento e a operação de secagem devem minimizar essas alterações através da escolha de condições de processamento ideais para cada produto (VEGA-MERCADO et al, 2001, FELLOWS, 2000).

Diferentes métodos de secagem podem ser utilizados para a produção de frutas e hortaliças desidratadas. A seguir, apresentam-se alguns destes processos.

### 2.2.1 Secagem convectiva

Na secagem convectiva, o ar quente transfere calor para o alimento, fornecendo o calor latente necessário para a evaporação da água da sua superfície. A evaporação da água para o ar a partir da superfície do alimento ocorre enquanto a umidade é transferida do interior do sólido até sua superfície. Nos estágios avançados de secagem, a evaporação da água ocorre no interior do produto. Assim, a secagem é uma operação em que ocorre simultaneamente os fenômenos de transferência de calor e de massa (FELLOWS, 2000; RATTI, 2008).

Os cálculos envolvidos na secagem convectiva são baseados nas características do escoamento do ar e movimentação do produto submetido à secagem, além das propriedades do ar e do material. Mais especificamente, a transferência de energia depende das temperaturas do ar e do alimento, da velocidade do ar e da área superficial do material (RATTI, 2008). A transferência de umidade no interior do alimento depende das características do produto, como da sua composição e estrutura, além da sua temperatura e teor de umidade. Já a transferência de umidade do sólido para o ar depende, essencialmente, da atividade da água na superfície do produto, da umidade relativa do ar e de sua velocidade de escoamento, além da área superficial do alimento (FELLOWS, 2000; RATTI, 2008). A pressão de operação é importante, pois menores pressões de operação (vácuo, por exemplo) implicam em menores temperaturas de secagem.

Na Figura 2.1 estão representadas uma curva típica de secagem, a curva da taxa de secagem e a evolução da temperatura do produto durante a secagem.

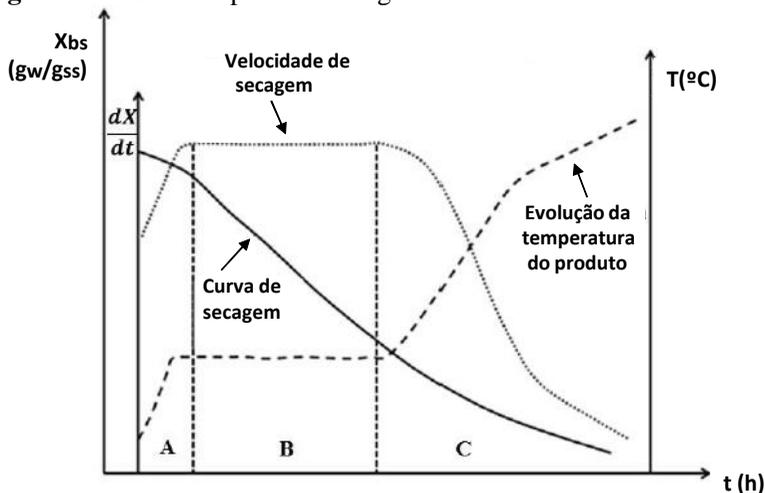
A curva de secagem, que representa a evolução do teor de umidade ( $X_{bs}$ , umidade em base seca) durante o processo de secagem, é normalmente obtida pesando o produto durante a secagem sob condições definidas de processamento (umidade relativa, temperatura, velocidade do ar). A curva da velocidade de secagem,  $(dX/dt)$ , é obtida diferenciando-se a curva de secagem em relação ao tempo. A curva da evolução da temperatura ao longo do processo também fornece informações importantes sobre os períodos de secagem (GEANKOPLIS, 1998).

Durante a operação de secagem convectiva é possível identificar três diferentes etapas, representadas pelas regiões *A*, *B* e *C* da Figura 2.1. O período inicial da secagem (região *A*) é chamado de período de acomodação. Nesta etapa, a temperatura do produto eleva-se rapidamente se a temperatura de sua superfície está mais baixa do que a do ar no início do processo. A região *B* representa o período de secagem à taxa constante, ou seja, a remoção da umidade ocorre à uma taxa constante. Isso acontece quando a água contida no interior do produto é transportada para a superfície na mesma velocidade com que ocorre a evaporação da água na superfície. Nesta etapa, a temperatura do produto permanece constante e é igual à temperatura de bulbo úmido do ar de secagem (GEANKOPLIS, 1998; FELLOWS, 2000).

Quando um teor de umidade crítico é alcançado (que depende das condições de secagem, para um dado produto), ocorre a transição do período de secagem à taxa constante para o período de secagem à taxa

decrecente (região C). Nesta etapa, a migração interna de água diminui, o que leva à diminuição da pressão parcial de vapor de água na superfície do produto. Consequentemente, ocorre a diminuição da velocidade de secagem, razão pela qual esse período é chamado de período à taxa de secagem decrescente. Além disso, nesta etapa, o ar de secagem continua fornecendo energia ao produto e a temperatura do alimento aumenta até a temperatura de bulbo seco do ar, já que não há mais o efeito do resfriamento evaporativo. É devido a este aumento de temperatura que muitos danos aos alimentos são causados nessa fase da secagem (GEANKOPLIS, 1998; FELLOWS, 2000; PARK et al., 2007). No final deste período (final da secagem), a pressão de vapor da água no alimento estará em equilíbrio com a pressão de vapor da água no ar e a velocidade de secagem é nula.

**Figura 2.1** - Curvas típicas de secagem



Fonte: Adaptado de Park et al. (2007).

### 2.2.2 Secagem a vácuo

A secagem a vácuo tem sido largamente utilizada para secar produtos sensíveis ao calor e à presença de oxigênio (METHAKHUP et al., 2005). Neste processo, a secagem ocorre em pressões menores que a pressão atmosférica. Nestas condições, tem-se a uma menor temperatura de saturação da água, fazendo com que o alimento seja exposto a temperaturas moderadas e baixas concentrações

de oxigênio durante todo o processo (ALIBAS, 2007; ŠUMIC et al., 2013). Dessa forma, alguns componentes nutricionais, como vitaminas e antioxidantes, que são deteriorados quando o produto é exposto a altas temperaturas e ao oxigênio, podem ser preservados utilizando a secagem sob vácuo. (SAGAR e KUMAR, 2010).

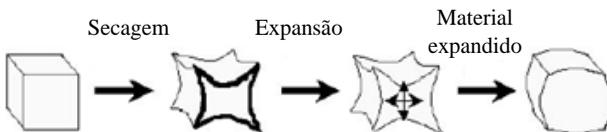
### 2.2.3 Liofilização

O processo de secagem por liofilização tem sido considerado um dos melhores para desidratar produtos termolábeis de alto valor agregado (OIKONOMOPOULOU et al., 2011). A técnica é baseada na desidratação por sublimação do produto congelado, o que favorece a manutenção da estrutura do produto, resultando em alimentos com estrutura altamente porosa, de fácil reidratação e com retenção de aromas, sabor e cor (OIKONOMOPOULOU et al., 2011; RATTI, 2001). Contudo, os custos do equipamento, o longo tempo de secagem e o alto consumo de energia tornam a liofilização um processo oneroso (RATTI, 2001; VARNALIS et al., 2001).

### 2.2.4 Puff Drying

O método *puff drying* pode ser utilizado para alterar as características estruturais dos alimentos e produzir um produto poroso com estrutura similar aos produtos liofilizados. É um processo que envolve a liberação ou expansão de um gás (por exemplo vapor) dentro do produto para expandir ou romper sua estrutura (PAYNE et al, 1989; VARNALIS et al., 2001). Na Figura 2.2 é apresentado o mecanismo da expansão (*puffing effect*).

**Figura 2.2-** Representação esquemática do mecanismo de *puffing*.



Fonte: Adaptado de Varnallis et al. (2001).

Neste processo, as frutas são parcialmente desidratadas, acondicionadas em uma câmara pressurizada e aquecidas por vapor superaquecido. O alimento é submetido a condições de alta pressão por um determinado tempo e devido a isso, a água contida em seu interior

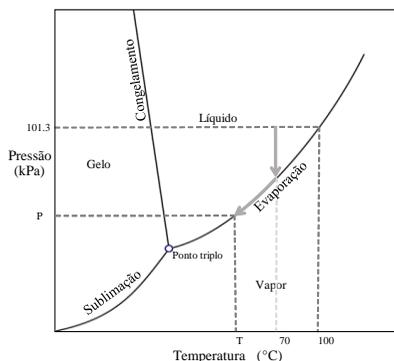
pode atingir temperaturas superiores a 100 °C. Quando o sistema é descomprimido até a pressão atmosférica, a água evapora instantaneamente provocando a expansão do produto e a geração de uma estrutura porosa (PAYNE et al, 1989; SULLIVAN e CRAIG, 1984).

### 2.2.5 Múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (*Multi-flash drying - MFD*)

O método de secagem denominado *Multi-Flash Drying* (MFD) vem sendo reportado como um método alternativo de secagem para a produção de frutas e hortaliças crocantes de alta qualidade (ZOTARELLI et al, 2012; PORCIUNCULA et al. 2016; MONTEIRO et al., 2016; MONTEIRO et al., 2018; LINK et al. 2017; LINK et al, 2018). Este processo de secagem foi desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina e é descrito no documento de patente PII107173-7 depositado por Laurindo, Porciuncula e Zotarelli (2011).

O processo baseia-se na aplicação de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. As amostras são aquecidas à pressão atmosférica, utilizando ar quente (*convective multi-flash drying - CMFD*), placas aquecidas (*conductive multi-flash drying - KMFD*) ou micro-ondas (*microwave multi-flash drying - MWMFD*) até atingirem a temperatura desejada. Em seguida, a pressão é subitamente reduzida (pulso de vácuo), ocasionando a rápida evaporação da água (evaporação *flash*) e o consequente resfriamento e texturização do produto (Figura 2.3) (LAURINDO et al, 2011).

**Figura 2.3** – Evaporação e resfriamento durante a aplicação de um pulso de vácuo.



Fonte: Adaptado de Monteiro (2018).

O efeito *puffing* ocorre durante a aplicação do pulso de vácuo e depende das condições de operação, como temperatura, pressão inicial e final e tempo de descompressão (LOUKA e ALLAF, 2002). A massa de água evaporada durante o pulso de vácuo é dada pela Equação 2.1 (ZOTARELLI et al, 2012).

$$\Delta m_w = \frac{c_p m_p \Delta T}{\Delta H_v} \quad (2.1)$$

em que  $\Delta m_w$  é a perda de massa (kg);  $c_p$  é o calor específico médio do produto no intervalo de temperaturas de trabalho ( $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $m_p$  é a massa inicial do produto (kg);  $\Delta T$  é a redução da temperatura do material durante a aplicação do vácuo e  $\Delta H_v$  é a entalpia específica de vaporização da água na pressão final de trabalho ( $\text{J/kg}$ ).

Os processos de secagem consomem muita energia e, além disso, o uso de combustíveis fósseis para o aquecimento do ar de secagem causa a emissão de gás carbônico para a atmosfera, associando esse processo a elevadas pegadas de carbono (medida da quantidade de emissões totais de dióxido de carbono que são geradas direta e indiretamente por uma atividade) (ESWARA RAMAKRISHNARAO, 2013; PIRASTEYH, 2014). Portanto, é necessário identificar meios eficientes de utilização da energia e o uso de fontes alternativas e sustentáveis (PIRASTEYH, 2014).

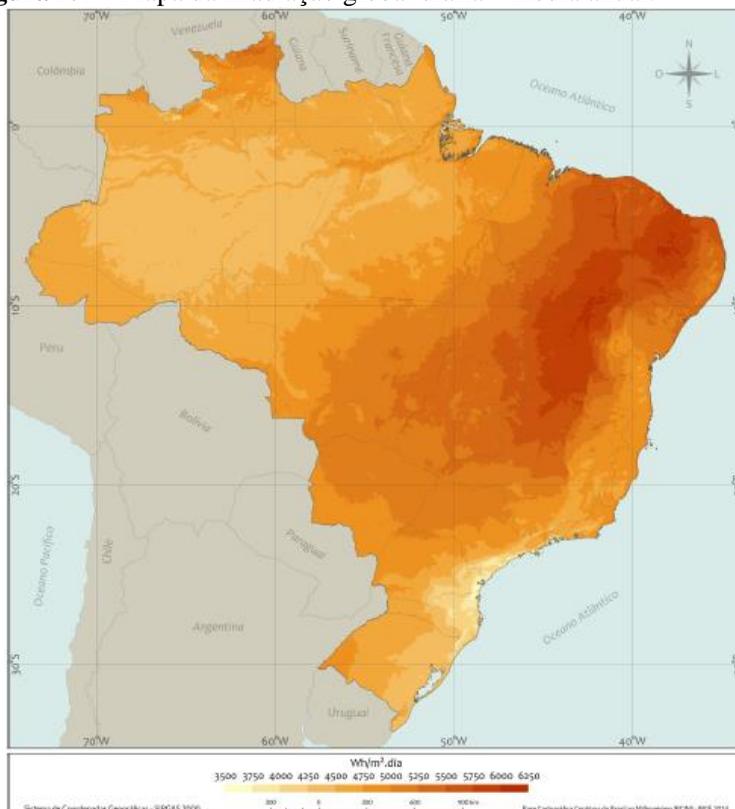
## 2.3 ENERGIA SOLAR

O sol é uma estrela de tamanho médio composta por 75% de hidrogênio e 25% de hélio. A irradiação de energia a partir do sol é consequência das reações de fusão nuclear dos átomos de hidrogênio para formar hélio (PEREIRA et al, 2017). A taxa de energia emitida pelo sol é aproximadamente constante há bilhões de anos e igual a  $3,8 \times 10^{23}$  kW, sendo que destes, aproximadamente  $1,08 \times 10^{14}$  kW chegam à superfície da terrestre. Isso faz com que a energia solar seja a fonte de energia renovável mais abundante na Terra. (PEREIRA et al, 2017; THIRUGNANASAMBANDAM et al, 2010).

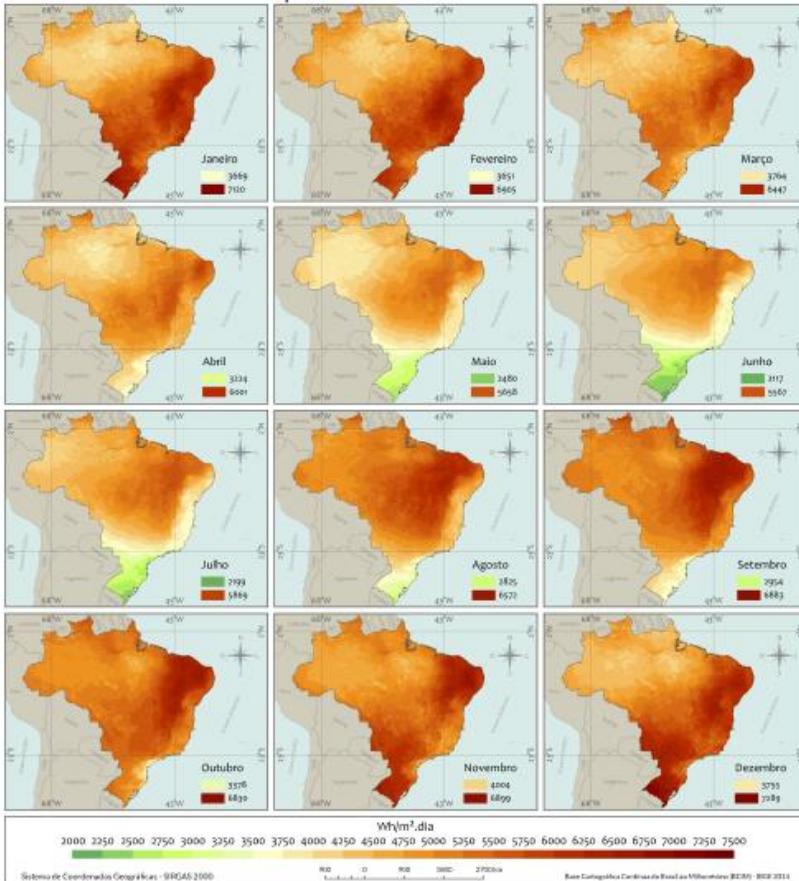
No Brasil, a região nordeste é a que apresenta o maior potencial solar, com valor médio diário de irradiação global de  $5,49 \text{ kWh/m}^2$ , além de apresentar baixa variabilidade mensal de irradiação. Em seguida, aparecem as regiões centro-oeste ( $5,07 \text{ kWh/m}^2$ ) e sudeste ( $5,06 \text{ kWh/m}^2$ ). A região norte apresentou um valor médio de  $4,64 \text{ kWh/m}^2$ , relativamente mais baixo que as regiões citadas devido à

nebulosidade frequente da região. Este valor é próximo ao encontrado na região sul ( $4,53 \text{ kWh/m}^2$ ), que apresenta características muito parecidas às encontradas em países europeus como Alemanha, Espanha, Itália, Portugal e França, principalmente no que se refere à variabilidade mensal. Isso acontece, pois, a região sul encontra-se em uma latitude mais alta em comparação às outras regiões brasileiras, acarretando em maiores diferenças na duração do dia em cada estação do ano (PEREIRA et al, 2017). A Figura 2.4 representa os valores diários da média anual da irradiação global nas diferentes regiões do país. Já na Figura 2.5, são mostradas as médias mensais de todo o território brasileiro, nela é possível observar a grande variabilidade mensal na região sul do país.

**Figura 2.4** – Mapa da irradiação global diária – média anual.



Fonte: PEREIRA et al, 2017.

**Figura 2.5** – Mapa da irradiação global diária – médias mensais.

Fonte: PEREIRA et al, 2017.

A radiação solar pode ser convertida em energia elétrica ou ser aproveitada como fonte de energia térmica para aquecimento de fluidos. A conversão da energia solar em energia térmica é realizada em coletores solares, enquanto que a conversão em energia elétrica pode ser realizada por painéis fotovoltaicos ou por heliotermia (energia solar térmica concentrada) (PEREIRA et al, 2017; ELLABBAN et al, 2014; SILVA, 2015).

### **2.3.1 Sistema fotovoltaico**

O Brasil tem um grande potencial para geração de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos (PEREIRA et al, 2017). Conforme explica Ellabban et al (2014), os sistemas solares fotovoltaicos (PV) convertem diretamente a energia solar em eletricidade. O componente principal de um sistema fotovoltaico é a célula fotovoltaica, que é um dispositivo semicondutor que converte a radiação solar em eletricidade de corrente contínua. As células fotovoltaicas são interligadas para formar um módulo fotovoltaico. Os módulos fotovoltaicos, combinados com um conjunto de componentes adicionais (inversores, baterias, componentes elétricos e sistemas de montagem), formam um sistema fotovoltaico. Os sistemas fotovoltaicos são altamente modulares, isto é, os módulos podem ser ligados entre si para fornecer energia que varia desde alguns watts até dezenas de megawatts (ELLABBAN et al, 2014).

### **2.3.2 Concentrador solar térmico**

A energia heliotérmica, conhecida como CSP (*concentrated solar power*), é utilizada para produção de energia elétrica através da concentração dos raios solares (AMAN et al, 2015). A radiação é concentrada em um receptor e aquece o fluido de trabalho. Então, energia recebida pelo fluido é convertida em energia mecânica em uma turbina a vapor, que, por fim, é transformada em energia elétrica em um gerador (SILVA, 2015). Podem ser utilizadas diferentes tecnologias para concentrar a irradiação solar e aquecer o fluido de processo (água ou óleo), que resulta em diferentes eficiências na conversão de energia térmica em elétrica. Entre as tecnologias existentes pode-se citar os coletores parabólicos e as torres concentradoras. (AMAN et al, 2015; PEREIRA et al, 2017; ESWARA, 2013).

### **2.3.3 Coletor solar térmico**

O aquecimento da água até temperaturas de 100 °C utilizando coletores solares está bem difundido no Brasil. É uma aplicação economicamente viável que está diretamente ligada ao custo de energia envolvido no aquecimento da água (PEREIRA et al, 2017).

Entre os coletores mais utilizados estão os coletores de placa plana e os coletores de tubo evacuado (PEREIRA et al, 2017). Os coletores planos consistem em um absorvedor de energia solar de placa plana escura, uma cobertura transparente que permite a passagem da energia

solar, mas reduz as perdas de calor, um fluido de transporte (por exemplo a água) para remover a energia do absorvedor e um reservatório térmico (ESWARA, 2013). O coletor solar de tubo evacuado é composto basicamente por tubos de vidro, um cabeçote em que os tubos estão inseridos e por onde passa o fluido de trabalho e uma estrutura que mantém os tubos na posição adequada para captação da energia solar, além de um reservatório térmico. Os tubos evacuados consistem em dois tubos concêntricos, sendo que o tubo interno está coberto por uma substância absorvedora e por onde circula o fluido de trabalho. Entre o tubo interno e o externo existe o isolamento a vácuo (DA ROSA, 2013).

Os coletores solares de tubo evacuado têm apresentado melhor desempenho que os coletores solares de placa plana, em particular para operações de alta temperatura. Estes coletores minimizam a perda de calor por convecção pois a superfície de absorção solar está isolada devido ao vácuo. Além disso, a perda de calor por radiação também é minimizada pelo uso de uma superfície de absorção de baixa emissividade (MORRISON et al, 2004).

## 2.4 ENERGIA SOLAR NA DESIDRATAÇÃO DE ALIMENTOS

As aplicações da energia solar abrangem desde processos agropecuários, cozimento de alimentos, dessalinização da água, além de já possuir um papel importante no processamento de alimentos em pequena escala (ESWARA e RAMAKRISHNARAO, 2013; PEREIRA et al, 2017). O setor agropecuário é parte importante da economia brasileira e a cadeia produtiva de alimentos contribui significativamente nas emissões globais de gases do efeito estufa. Deste modo, a energia solar, uma fonte de energia alternativa, pode ser utilizada em diversas operações da indústria alimentícia, em especial na secagem de frutas, hortaliças e outros produtos agrícolas, diminuindo a pegada de carbono deste processo (GARNET, 2010; BELESSIOTIS e DELYANNIS, 2011; MOTEVALI e KOLOOR 2017; PEREIRA et al, 2017).

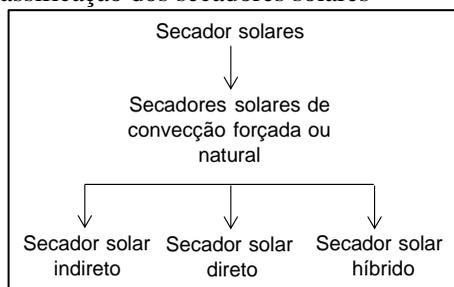
A secagem solar é largamente utilizada para a preservação de produtos agrícolas nas regiões dos trópicos e subtropicais, especialmente para produções de pequena e média escala (JANJAI e BALA, 2012; BELESSIOTIS e DELYANNIS, 2011). Entre as vantagens da secagem solar, estão o baixo custo, seu caráter não poluente e abundante (MOTEVALI e KOLOOR, 2017).

O uso da radiação solar é especialmente favorável nas regiões onde a intensidade da radiação solar é alta e o período de incidência solar é longo (THIRUGNANASAMBANDAM et al, 2010). Portanto, é viável

utilizar a energia solar em um sistema de secagem e em outros processos industriais, considerando que a radiação solar é ilimitada e disponível na maior parte do mundo. Além disso, esta secagem ocorre sem a produção de gases causadores do efeito estufa contribuindo para uma solução para o aquecimento global (BELESSIOTIS e DELYANNIS, 2011; MOTEVALI e KOLOOR, 2017; PIRASTEH et al, 2014).

Os secadores solares podem assumir diversas configurações e podem ser classificados em dois grandes grupos: os secadores ativos (convecção forçada) e os secadores passivos (convecção natural). Além disso, eles podem ser subdivididos em três outras categorias: secador solar direto, indireto ou híbrido, como mostra a Figura 2.6 (TIWARI, 2016; KUMAR et al, 2016).

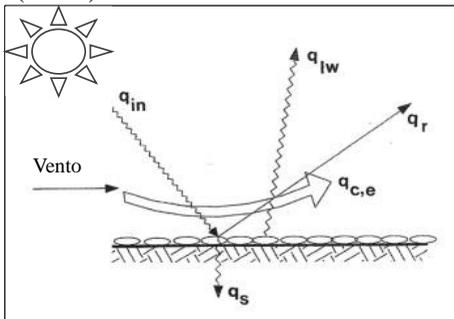
**Figura 2.6** - Classificação dos secadores solares



Fonte: Adaptado de Kumar et al., (2016).

Na secagem solar direta (Figura 2.7) a radiação solar é utilizada para aquecer diretamente o material (BELESSIOTIS e DELYANNIS, 2011). Os produtos são geralmente espalhados no chão, em tapetes expostos ou dentro de uma cabine onde recebem energia solar durante a maior parte do dia, além da circulação de ar natural (SHARMA, 2009; VISA VALE, 2012, BELESSIOTIS e DELYANNIS, 2011). A radiação absorvida é convertida em energia térmica e a temperatura do material aumenta. No entanto, há perdas de calor devido à reflexão, à convecção e também para a superfície de apoio (SHARMA, 2009). O processo é independente de qualquer outra fonte de energia, resultando em baixo custo de operação. No entanto, a taxa de secagem é baixa, a exposição prolongada ao sol diminui a qualidade do produto e pode haver perdas devido a fatores climáticos e naturais (chuva repentina e ataque de insetos, por exemplo) (SHARMA, 2009; VISA VALE, 2012, BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

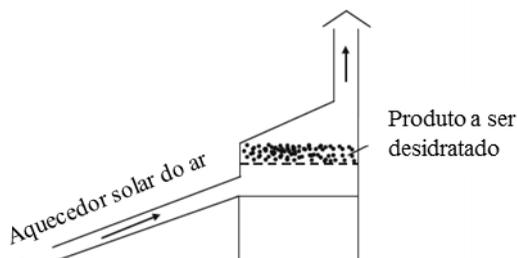
**Figura 2.7** – Princípio da secagem solar direta. Em que:  $q_{in}$  = energia solar incidente ( $W/m^2$ );  $q_{lw}$  = ondas longas de perda de calor ( $W/m^2$ );  $q_r$  = perda de calor devido à reflexão ( $W/m^2$ );  $q_{c,e}$  = perda convectiva e evaporativa devido ao movimento do vento ( $W/m^2$ );  $q_s$  = perda de calor para a superfície ( $W/m^2$ ).



Fonte: Adaptado de Belessiotis e Delyannis (2011).

A secagem solar indireta caracteriza-se por ser uma secagem convectiva em que o ar quente fornece a energia necessária para evaporação da água do alimento (SHARMA, 2009). Os secadores indiretos (Figura 2.8) são, normalmente, compostos por pelo menos duas partes: coletor solar (converte a radiação solar em calor e aquece o ar de secagem) e câmara de secagem (espaço onde os produtos a serem secos são dispostos). É um secador mais eficiente e que ocupa menor área quando comparado ao secador solar direto. O produto final apresenta melhor qualidade por não estar diretamente exposto à radiação solar. Porém, apesar de a secagem não durar vários dias, como no caso do secador direto, o tempo de secagem ainda é longo (15-30 h) (SHARMA, 2009; VISA VALE, 2012, BELESSIOTIS; DELYANNIS, 2011).

**Figura 2.8** – Sistema de secagem solar indireta por convecção natural.



Fonte: Adaptado de Janjai e Bala (2012).

Entre as vantagens da secagem solar, podem ser citados o baixo custo, caráter não poluente e a utilização de uma fonte de energia renovável, gratuita e abundante. No entanto, muitas limitações dificultam o aumento da produção utilizando secadores solares (IMRE, 2014; PRAKASH e KUMAR, 2014). Além disso, é importante manter as condições de secagem constantes e obter uma alta taxa de secagem para assegurar uma produção de qualidade. Portanto, secadores solares híbridos com sistemas auxiliares de aquecimento são mais indicados para uso industrial. (JAYARAMAN e GUPTA, 2014; CONDORÍ et al., 2017).

A utilização de energia solar como única fonte de energia é recomendada para secadores de pequena escala, onde o risco de deterioração de grandes quantidades de produto devido ao mau tempo é baixo. Se secadores solares de grande escala forem utilizados para fins comerciais, é altamente recomendável equipar o secador com um sistema que supra a necessidade de energia em períodos com mau tempo (TIWARI, 2016).

Os secadores híbridos utilizam a radiação solar térmica e uma outra fonte de energia, como por exemplo, energia elétrica, combustíveis fósseis ou biomassa (ESWARA e RAMAKRISHNARAO, 2013 e BELESSIOTIS e DELYANNIS, 2011). Estes secadores apresentam a possibilidade de controle do processo, mantendo as condições de secagem uniformes. Por utilizar uma fonte de energia térmica auxiliar, que compensa as flutuações climáticas, os sistemas híbridos de secagem permitem a obtenção de maiores taxas de secagem (SHARMA, 2009; VISAVALE, 2012). A qualidade dos produtos secos em secadores solares híbridos é muito boa, devido ao fato dos alimentos não ficarem expostos à radiação solar direta, além de o processo de secagem ser mais curto (TIWARI, 2016).

Diversos modelos de secadores de alimentos que combinam a utilização da radiação solar juntamente com outra forma de energia têm sido estudados nos últimos anos e mostram bons resultados. No Quadro 2.2 são apresentados diversos trabalhos encontrados na literatura sobre secadores solares híbridos desenvolvidos e matéria-prima avaliada, fontes de energia utilizadas, processo de secagem aplicado, estudos realizados e principais resultados encontrados.

**Quadro 2.2** - Estado da arte sobre o desenvolvimento de secadores solares híbridos.

<b>Secador</b>	<b>Fontes de energia</b>	<b>Estudo realizado</b>	<b>Resultados</b>	<b>Referência</b>
Secador de leito fluidizado	Solar térmica e queima de biomassa	Estudo de um secador de leito fluidizado para secagem de arroz. O ar de secagem é aquecido primeiramente em um coletor solar e em seguida em uma fornalha de biomassa.	Foram obtidos menores tempos de secagem comparados aos secadores solares convectivos.	YAHYA, FUDHOLI e SOPIAN (2016)
Secador convectivo de bandejas	Solar térmica com acumulação e elétrica	Desenvolvimento de um secador para desidratação de cogumelos. O sistema possui um painel solar para aquecimento do ar e um acumulador de energia à base de parafina. O ar reciclado é misturado com ar novo e a mistura passa por tubos com aletas que contém parafina e por resistências elétricas.	O uso de energia solar permitiu reduzir o consumo de energia elétrica e a incorporação de um acumulador de energia contribuiu significativamente para melhorar a eficiência térmica global do sistema.	REYES, MAHN e VÁSQUEZ (2014)
<i>Spray Dryer</i> a vácuo	Solar térmica e fotovoltaica e recuperação de calor	Projeto para dessanilizar água salgada em um <i>spray dryer</i> a vácuo utilizando energia solar e recuperação de calor.	O projeto prevê o uso de energia solar e recuperação de calor perdido pela bomba de vácuo e painel fotovoltaico e de calor latente de evaporação para produzir 15 kg/m <sup>2</sup> /dia de água pura.	HAMAWAND et al. (2017)

Secador de túnel com convecção forçada	Solar térmica e elétrica	Desenvolvimento de um sistema de secagem de vegetais com convecção forçada de escala semi-industrial. Utilização de dez coletores solares para o aquecimento do ar e de um ventilador para garantir sua circulação.	O banco de coletores permitiu uma maior uniformidade da temperatura na câmara de secagem, garantindo temperaturas acima de 50 °C por 6 h/dia. A operação do é viável no local onde foi instalado.	CONDORÍ et al. (2017)
Secador convectivo de bandejas	Solar térmica com acumulação e elétrica	Desenvolvimento de um secador para secagem de plantas medicinais. Opera com dois coletores solares: um para aquecimento do ar de secagem e outro para aquecimento de água.	A água quente foi armazenada e serviu como fonte de energia quando o ar não era suficientemente aquecido pelo coletor solar compensando a variação da radiação solar e garantindo a estabilidade do processo.	ČIPLIENĚ et al. (2015)
Secador convectivo de bandejas	Solar térmica com acumulação e elétrica	Estudo de um secador para desidratação de banana. As placas do coletor solar aquecem o ar e podem ser posicionadas de acordo com a angulação solar. Além disso, no coletor também há tubos por onde circula água.	O secador pode operar à noite devido à energia acumulada em um tanque de 500 L de água. Resistências elétricas auxiliavam no aquecimento da água. Foi possível secar 30 kg de banana em 8h até 18% de umidade (b.u). Nestas condições, em um secador solar a umidade final seria de 62%.	AMER, HOSSAIN e GOTTSCHALK (2010)

Além dos estudos de desenvolvimento de equipamentos apresentados anteriormente, Motevali e Koloor (2017) estudaram a emissão de poluentes e de gases que provocam o efeito estufa por diferentes secadores. Eles concluíram que o uso da energia solar, para suprir parte da energia necessária nos processos de desidratação a baixas temperaturas, pode contribuir para a redução da emissão de gases que causam o efeito estufa. Uma comparação dos níveis de emissão destes gases entre os secadores convectivos e os secadores solares revelou que a energia solar pode reduzir significativamente a emissão dos poluentes.

Um sistema de secagem solar híbrida pode assumir diversas configurações e operar em diferentes condições de processamento. Portanto, a aplicação da radiação solar nos processos de secagem mostra-se como um método efetivo, barato e seguro para a secagem de alimentos e outros produtos agrícolas (KUMAR, 2016).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 SISTEMA DE SECAGEM SOLAR

O secador piloto (Figura 3.1) foi construído no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI), localizado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em Florianópolis – SC. Seu funcionamento é baseado na aplicação do processo de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (*multi-flash drying*), usando condução (contato com a base metálica aquecida) como método de transferência de calor para o aquecimento das amostras.

O equipamento é composto por quatro câmaras de secagem de alumínio (3), cada uma com volume de 6,25 L (0,5 m x 0,5 m x 0,025 m), conectadas a um sistema de vácuo. Essas câmaras são aquecidas na sua base pelo vapor produzido pela água quente mantida por um sistema de aquecimento.

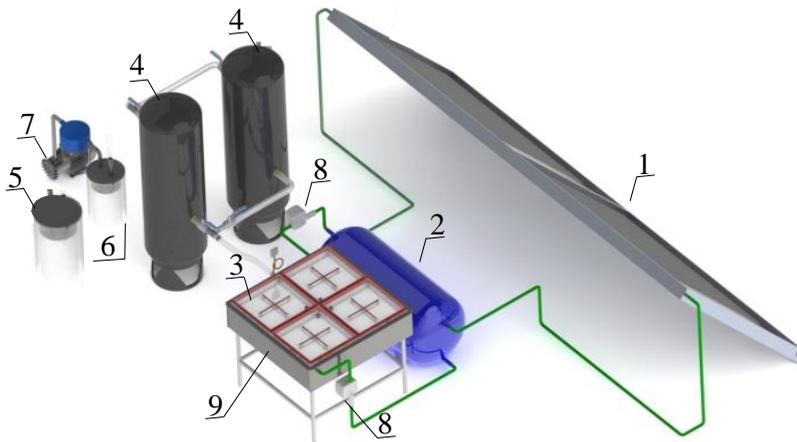
O sistema de vácuo é constituído por uma bomba de vácuo (DVP, modelo - LC.40, Itália) (7), por dois tanques de vácuo, cada um com volume interno de 442,7 L (SCHULZ, modelo – LCS, Brasil) (4), utilizados como banco de vácuo, para rápida descompressão das câmaras de secagem quando desejado; por um condensador e um banho termostático (MS980 TMP) com solução de etilenoglicol a -11 °C (5), além de uma coluna de sílica gel – *trapping* (6). Entre a bomba de vácuo e o *trapping* de sílica há um filtro coalescente (DVP, modelo - FSC.100, Itália) para remover possíveis materiais que estejam no equipamento e que poderiam chegar até a bomba e danificá-la.

O sistema de aquecimento é composto por dois coletores solares de tubos evacuados (Ecologic, modelo - BNP-1-30 tubos, Brasil) (1) com capacidade de produção de 346,15 kWh/mês, um reservatório de água (“*boiler*”) com resistência elétrica (3 kW) (2), um tanque de aço inox com isolamento térmico (9) e três bombas (Inova, modelo – GP-100, Brasil) (8) para a circulação da água quente no seu interior. Assim, os tubos evacuados absorvem a energia solar e aquecem a água, que é armazenada no “*boiler*” e recirculada no tanque de aço inox, sobre o qual as câmaras de secagem estão apoiadas. O vapor liberado pela água quente no tanque de aço inox entra em contato com as câmaras de secagem, condensa e cai no próprio tanque.

A energia necessária para o funcionamento de todas as partes que compõe o secador piloto provém da energia solar e da rede elétrica. A energia elétrica é fornecida para o funcionamento da bomba de vácuo, das

bombas de circulação de água, da resistência elétrica do reservatório de água e dos banhos termostáticos.

**Figura 3.1-** Vista lateral do equipamento multiuso de secagem de alimentos. (1) Coletor solar de tubo evacuado; (2) Reservatório de água com apoio elétrico (“boiler”); (3) Câmaras de secagem; (4) Tanque pulmão de vácuo; (5) Condensador; (6) Coluna sílica gel – *trapping*; (7) Bomba de vácuo.; (8) Bombas de circulação de água; (9) Tanque de água com isolamento térmico.



Fonte: Autora.

O sistema de secagem solar foi instrumentado para permitir o monitoramento da variação da temperatura das amostras e da pressão das câmaras de secagem. A variação de tempo-temperatura dos produtos foi monitorada por termopares do tipo T (Iope, Modelo A-TX-TF-TF-R30AWG, Brasil), inseridos em oito amostras, em diferentes posições do secador. Os termopares foram calibrados na faixa de temperatura de 0 °C a 100 °C, usando um termômetro de mercúrio como referência, (modelo ASTM, Incoterm, Brasil) e hermeticamente conectados à câmara de secagem. A pressão das câmaras de secagem foi monitorada por um manômetro digital (modelo IT-MN-DG, Velki, Brasil), enquanto a pressão nos tanques pulmão foi monitorada por um vacuômetro analógico com glicerina (WARME, modelo - 2WP3610, Brasil). A temperatura da água de aquecimento foi mantida próxima de 90 °C, monitorada por um termopar do tipo T.

A água deve ser aquecida até 90 °C para liberar o vapor utilizado para aquecer a superfície inferior das câmaras de secagem, que aquecem as amostras por condução. No início do processo, quando há aquecimento e maiores taxas de evaporação, há uma maior demanda de energia térmica. Portanto, a energia acumulada na água deve ser suficiente para suprir esta necessidade. A estimativa aproximada da potência térmica ( $Q$ ) necessária foi calculada com a Equação 3.1.

$$Q = \frac{X_{bs} m_{ss} \times H_v}{t} \quad (3.1)$$

em que  $X_{bs}$  é a umidade em base seca ( $\text{g g}^{-1}$ ) inicial das amostras,  $m_{ss}$  é a massa de sólidos secos,  $H_v$  é a entalpia de vaporização da água ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ) e  $t$  é o tempo (s).

Os cálculos foram feitos com base em dados experimentais de trabalhos anteriores (LINK, 2016), considerando que a maior demanda térmica ocorre nos primeiros 80 min de secagem para um produto com umidade inicial de aproximadamente 80% (base úmida). A demanda térmica foi estimada em 2 kW.

Sendo assim, foram instalados dois grupos de coletores solares de 30 tubos evacuados (Figura 3.2), cada grupo com capacidade de produção de 346,15 kWh/mês, conectados a um reservatório térmico (“boiler”) com o apoio de uma resistência elétrica de 3 kW. Os coletores foram instalados voltados à direção norte e com um ângulo de 37° com o chão.

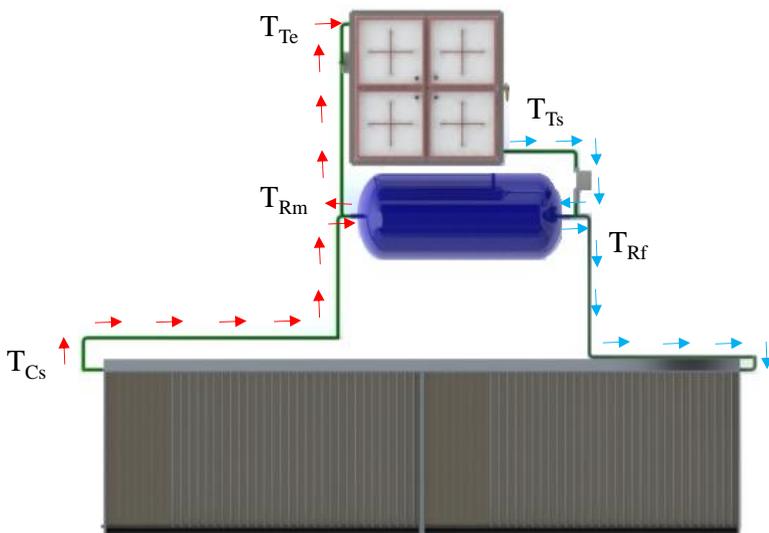
**Figura 3.2** – Coletores solares de tubo evacuado utilizados no secador *Zero-Carbon-Vacuum Food Dryer*.



Fonte: Autora.

Aproximadamente 500 L água circulam entre os coletores, o reservatório térmico e o tanque de água, usando bombas de circulação que são acionadas por diferença de temperatura (Figura 3.3). Sempre que  $T_{RM}$  for  $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  maior que  $T_{TE}$ , a bomba de circulação é ativada e a água flui do reservatório térmico para o tanque. Dentro do tanque, foram instaladas duas chapas de aço inox para guiar o sentido de circulação da água e minimizar possíveis gradientes de temperatura na superfície das câmaras de secagem. Assim, a água entra pela lateral esquerda na parte superior e sai pela lateral direita na parte inferior do tanque, sendo que  $T_{TE}$  é maior que  $T_{TS}$ . Quando sai do tanque, a água segue para o reservatório térmico. Sempre que  $T_{RF}$  estiver  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  abaixo da  $T_{CS}$ , a água flui do coletor para o reservatório térmico.

**Figura 3.3** – Representação do sentido de circulação da água no sistema de secagem desenvolvido. Em que  $T_{TE}$  é a temperatura da água no tanque;  $T_{TS}$  é a temperatura da água na saída do tanque;  $T_{RM}$  é a temperatura da água medida no meio do reservatório térmico;  $T_{RF}$  é a temperatura da água no fundo do reservatório térmico e  $T_{CS}$  é a temperatura da água no coletor solar.

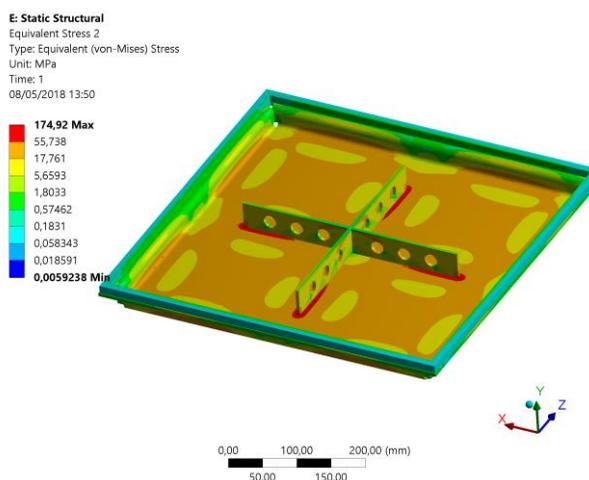


Fonte: Autora.

O equipamento desenvolvido é versátil quanto à sua operação. Os produtos são aquecidos atualmente por condução, mas as amostras

poderão ser aquecidas por radiação caso o secador seja instalado na área externa das edificações, pois as câmaras de secagem possuem tampas de vidro. Foram realizadas simulações com o *software* SolidWorks (Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC), para verificar a resistência do vidro e da chapa de alumínio das câmaras de secagem quando submetidos ao vácuo. O resultado é apresentado na Figura 3.4.

**Figura 3.4** – Resultado da simulação realizada no *software* SolidWorks para verificar a resistência dos materiais que compõe a câmara de secagem durante a aplicação de vácuo.



Fonte: Autora.

Um suporte em formato de cruz foi projetado com o objetivo de distribuir as tensões causadas no centro da câmara e da tampa de vidro. Também foram definidas as espessuras mínimas tanto do vidro quanto da chapa de alumínio: 10 e 5 mm respectivamente. As tampas de vidro são colocadas sobre borrachas de silicone coladas nas bordas das câmaras de secagem. Para garantir uma boa vedação, as borrachas foram fixadas utilizando silicone adequado para alta temperatura. Quando o vácuo é aplicado, a borracha é compactada devido à pressão externa que age sobre o vidro, garantindo a manutenção do vácuo no interior das câmaras.

Diferentes pressões de trabalho também podem ser utilizadas no processo de secagem. Para regular a pressão, foi instalada uma válvula agulha entre o tanque pulmão e as câmaras de secagem. Os tanques pulmões são utilizados para garantir uma rápida evacuação das câmaras

de secagem. Portanto, o uso de dois, um ou nenhum tanque pulmão levará à obtenção de diferentes taxas de descompressão do sistema. A taxa de descompressão média é calculada através da Equação 3.2.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_{atm} - P_f}{\Delta t} \quad (3.2)$$

em que  $\frac{dP}{dt}$  é a taxa de descompressão média ( $\text{mbar s}^{-1}$ );  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica ( $\text{mbar}$ );  $P_f$  é a pressão final do sistema ( $\text{mbar}$ ) e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo (s) necessário para reduzir a pressão de  $P_{atm}$  até  $P_f$ .

Na Figura 3.5 é mostrada uma imagem do sistema de secagem montado no interior do Laboratório de Propriedades Física de Alimentos, PROFI-UFSC.

**Figura 3.5** – Secador *Zero-Carbon-Vacuum Food Dryer* desenvolvido no PROFI.



Fonte: Autora.

### 3.1.1 Operação de secagem

#### Aplicação de um pulso de vácuo

Quando a água contida no tanque posicionado abaixo das câmaras de secagem atingir a temperatura de 90 °C, as amostras são colocadas sobre as superfícies superiores das câmaras, cujas superfícies inferiores são aquecidas pelo vapor produzido pela água quente que circula no tanque de inox. Simultaneamente, a pressão nos tanques pulmões é reduzida pela bomba de vácuo até 18 mbar. Quando as amostras atingem a temperatura de aquecimento escolhida, uma válvula esfera posicionada entre as câmaras de secagem e os tanques pulmões é aberta e as câmaras são rapidamente descomprimidas.

A bomba de vácuo trabalha de forma contínua. Para garantir o vácuo e evitar que o vapor gerado durante o processo de secagem chegue à bomba, foi instalado um condensador e um *trapping* de sílica. Assim, os vapores (água evaporada das amostras) saem da câmara de secagem, passam pelo tanque pulmão e seguem para o condensador. Neste, circula aproximadamente 40 L de uma solução de etileno glicol 35% V/V a uma temperatura de -11 °C, que condensa os vapores quando estes entram em contato com a superfície resfriada do condensador. Um *trapping* de sílica, posicionado logo após o condensador, é utilizado para adsorção do vapor de água a baixa pressão. Ao final da secagem, a válvula esfera é fechada e a válvula agulha é aberta para reestabelecimento da pressão atmosférica.

### 3.2 DESEMPENHO DO COLETOR SOLAR DE TUBO EVACUADO

Analisando os mapas de irradiação mostrados nas Figuras 2.4 e 2.5, percebe-se que o Brasil recebe elevada irradiação, porém ela não é suficiente para garantir altas temperaturas durante todo o ano (PEREIRA ET AL, 2017). Além disso, é possível observar que a região de Florianópolis recebe baixa irradiação solar quando comparada a outras regiões brasileiras. Portanto, decidiu-se avaliar o comportamento do coletor solar de tubos evacuados em diferentes dias do mês de janeiro de 2019, período de maior incidência de irradiação solar na região.

As temperaturas da água no coletor solar, no tanque e no reservatório térmico, e a temperatura ambiente interna foram coletadas de hora em hora das 8 h às 18 h no mês de janeiro e também durante os experimentos de secagem realizados em dezembro de 2018.

Os dados de radiação média e temperatura ambiente externa foram extraídos da plataforma Agroconnect, do Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (Ciram), vinculado à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri). Esta estação meteorológica da EPAGRI está localizada em Florianópolis, no bairro Itacorubi, a aproximadamente 3 km do local onde está instalado o coletor solar. O horário de verão foi corrigido para o horário normal para efeitos de comparação entre os diferentes meses do ano.

### 3.3 EXPERIMENTOS DE SECAGEM

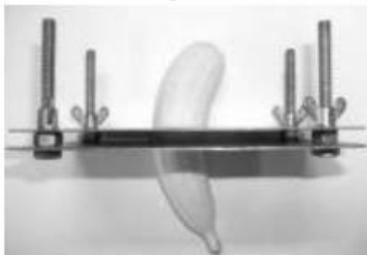
#### 3.3.1 Avaliação do secador

O secador foi avaliado quanto à sua capacidade de desidratar frutas de maneira homogênea com relação ao teor de umidade nas quatro câmaras de secagem. Para isso, a água foi aquecida pelos coletores solares e com o auxílio da resistência elétrica localizada dentro do reservatório térmico, com *setpoint* de funcionamento ajustado em 94°C.

A fruta escolhida para teste foi a banana da variedade Prata (*Musa Sapientum* L.), adquirida no comércio local (Florianópolis, SC, Brasil) e mantida sob refrigeração até o momento da sua utilização. A seleção das frutas foi realizada pelo grau de maturação, determinado pela análise visual e conteúdo de sólidos solúveis (SST). O teor de SST foi medido por um refratômetro óptico com resolução 0,1°Brix (Pocket refractometer Atago, Modelo - PAL-BX/RI, Japão).

As amostras selecionadas foram lavadas, descascadas manualmente e posteriormente cortadas em fatias de 5 mm de espessura. Para obtenção de fatias com espessura uniforme, foi utilizado um cortador metálico (Figura 3.6).

**Figura 3.6** – Dispositivo utilizado para os cortes das bananas



Fonte: Porciuncula (2010).

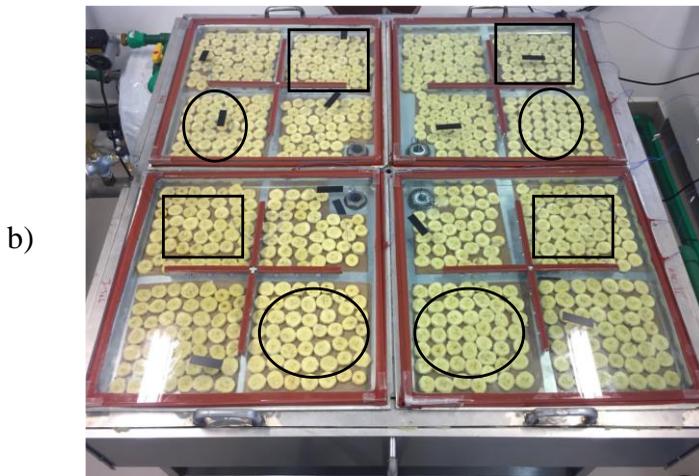
Aproximadamente 4000 g de fatias de banana foram utilizadas para determinar as cinéticas de secagem e as propriedades das amostras após a secagem. As amostras foram posicionadas sobre filmes plásticos (Teflon®), para evitar a adesão na superfície metálica, e colocadas no interior da câmara de secagem. Foram inseridos termopares em oito amostras para o monitoramento da temperatura das bananas durante a secagem.

O processo de secagem KMFD consistiu no aquecimento das frutas até 70 °C e aplicação de um pulso de vácuo até pressão final de 40 mbar. Antes e após o primeiro pulso de vácuo e depois em tempos pré-determinados, a pressão atmosférica era reestabelecida e um quadrante de cada câmara de secagem era retirado do secador e pesado. Os quadrantes eram retirados e devolvidos simultaneamente ao secador. Este processo foi realizado em duplicata: KMFD (7,6 mbar s<sup>-1</sup>) e KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>). A Figura 3.7 mostra a numeração adotada para identificar cada quadrante das câmaras de secagem e a distribuição das fatias de banana indicando os quadrantes selecionados em cada replicata. A umidade foi determinada no início e no final do processo utilizando quatro amostras de cada quadrante selecionado.

**Figura 3.7** – Distribuição das fatias de banana no secador. a) numeração dos quadrantes do secador; b) indicação dos quadrantes avaliados na secagem ( $\square$ ) KMFD (7,6 mbar s<sup>-1</sup>) e ( $\circ$ ) KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>).

a)

3.1	3.2	4.1	4.2
3.3	3.4	4.3	4.4
2.1	2.2	1.1	1.2
2.3	2.4	1.3	1.4



Fonte: Autora.

### 3.3.2 Secagem KMFD com aplicação de um pulso de vácuo

Diferentes taxas de descompressão das câmaras de secagem foram avaliadas para obter fatias de bananas desidratadas com texturas crocantes pelo método *conductive multi-flash drying*, com aplicação de um pulso de vácuo seguido por um período de vácuo constante (KMFDVD).

Aproximadamente 4000 g de fatias de banana foram colocadas sobre filmes plásticos (Teflon®) e inseridas no interior das câmaras de secagem. Foram inseridos termopares em oito amostras para o monitoramento da temperatura das frutas durante a secagem.

As fatias de banana foram aquecidas à pressão atmosférica até atingirem 70 °C. Então, as câmaras de secagem foram evacuadas com diferentes taxas de descompressão e a pressão foi mantida em 40 mbar até o final do processo. O conteúdo de umidade das amostras foi determinado no início e no final da secagem.

As secagens foram realizadas utilizando-se: i) 2 tanques pulmões; ii) 1 tanque pulmão; iii) apenas o condensador; para a obtenção de diferentes taxas de descompressão. Foi realizado apenas um experimento de secagem para cada taxa de descompressão obtida. Desgastes nas vedações do sistema, oriundos do uso contínuo do equipamento, levaram ao surgimento de pequenos vazamentos, dificultando a realização de duplicatas.

### 3.3.3 Secagem sem apoio elétrico contínuo

Foi avaliada a capacidade do sistema operar sem apoio elétrico contínuo. O experimento foi realizado em um dia de sol com grande incidência de radiação solar. A água foi aquecida inicialmente com o auxílio da resistência elétrica até atingir 90 °C. A resistência foi desligada no início da secagem e foi avaliada a capacidade de o coletor solar manter a temperatura da água durante o processo.

A metodologia utilizada para a secagem sem apoio elétrico contínuo (KMFDVD\_SOLAR) é a mesma apresentada no item 3.3.2. e as câmaras de secagem foram evacuadas utilizando apenas o condensador.

## 3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DO PRODUTO FINAL

Para as análises descritas abaixo, amostras de diferentes quadrantes foram colocadas em recipientes e acondicionadas por 7 dias

em uma câmara com solução salina saturada de acetato de potássio com umidade relativa controlada em 24,6% e temperatura de 25 °C. Após atingirem a mesma atividade de água ( $a_w$ ), as amostras foram caracterizadas quanto às propriedades físico-químicas. Esse procedimento foi realizado para efeito de comparação entre diferentes processos, pois a  $a_w$  influencia diretamente nas propriedades de crocância.

### 3.4.1 Teor de umidade e atividade de água

A umidade das amostras foi determinada por método gravimétrico (Shimadzu, Modelo - AY220, Filipinas), em estufa a vácuo (TECNAL TE-395, Brasil) a 70 °C, segundo a metodologia da AOAC (2005). As análises foram realizadas utilizando quatro amostras para cada quadrante das quatro câmaras de secagem.

A atividade de água foi determinada em higrômetro digital (Aqualab Modelo - Series 3 TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, EUA) pela medida do ponto de orvalho a 25 °C. Cinco amostras de cada quadrante eram trituradas e a leitura no higrômetro realizada.

### 3.4.2 Volume aparente e massa específica aparente

O volume aparente ( $V_{ap}$ ) foi determinado indiretamente pela medida da força de empuxo da amostra imersa em *n*-heptano (LOZANO et al., 1980). Um suporte para as amostras foi suspenso na parte inferior de uma balança analítica (Marte, Modelo-AY220, Filipinas), e sua massa medida no ar ( $m_c$ ) e imersa em *n*-heptano ( $m_{c,h}$ ) foram registradas. Uma amostra de banana foi colocada no suporte e suas massas no ar ( $m_{c,m}$ ) e imersa em *n*-heptano ( $m_{c,m,h}$ ) foram registradas. O volume aparente foi calculado de acordo com a Equação 3.3. O *n*-heptano utilizado possuía massa específica igual a 0,68 g cm<sup>-3</sup>a 25 °C. A análise foi realizada com quatro amostras para cada processo.

$$V_{ap} = \frac{(m_{c,b} - m_c) - (m_{c,b,h} - m_{c,h})}{\rho_s} \quad (3.3)$$

na qual  $m_{c,b}$  é a massa da cesta com a amostra de banana;  $m_c$  é a massa da cesta vazia;  $m_{c,b,h}$  é a massa da cesta com a amostra de banana imersa em *n*-heptano;  $m_{c,h}$  é a massa da cesta vazia imersa em *n*-heptano e  $\rho_s$  é a massa específica do solvente *n*-heptano.

A massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ) das amostras foi determinada pela razão entre a massa da amostra ( $m_b$ ) e o volume aparente (Equação 3.4).

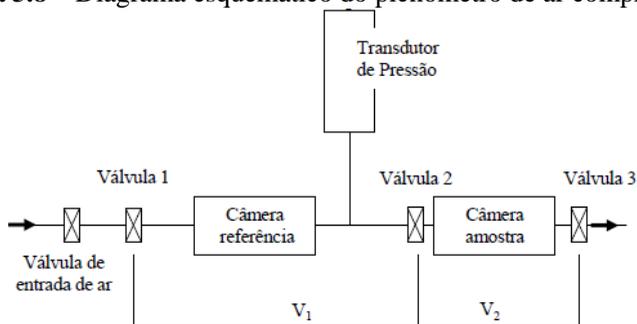
$$\rho_{ap} = \frac{m_b}{V_{ap}} \quad (3.4)$$

### 3.4.3 Volume real

O volume real ( $V_r$ ) das amostras foi determinado utilizando um picnômetro de ar comprimido (Figura 3.8), construído para trabalhar com sólidos úmidos ou secos, através da metodologia proposta por Sereno et al. (2007).

O picnômetro é um instrumento que utiliza ar comprimido como fluido de preenchimento dos espaços vazios de uma amostra, desde que os poros do produto tenham no mínimo o tamanho da molécula de gás. O restante da amostra, na qual o gás não penetra, é considerado como volume de sólido. O picnômetro mede a mudança na pressão do experimentado por uma quantidade conhecida de gás comprimido dentro de uma câmara de referência (volume constante). Quando o gás se expande para uma segunda câmara contendo a amostra, ocorre uma mudança na pressão e temperatura.

**Figura 3.8** – Diagrama esquemático do picnômetro de ar comprimido.



Fonte: Adaptado de Sereno et al. (2007).

Assumindo comportamento de gás ideal é possível calcular o volume real da amostra através da Equação 3.5. A análise foi realizada com quatro amostras de cada processo.

$$V_r = \frac{V_1 \left( \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1} - 1 \right)}{\left( \frac{P_{atm} T_2}{P_2 T_{amb}} - 1 \right)} + V_2 \quad (3.5)$$

na qual  $P_{atm}$  e  $T_{amb}$  são a pressão e a temperatura medida com picnometro vazio e a válvula 1 fechada.  $P_1$  e  $T_1$  são a pressão e a temperatura medida após o equilíbrio da compressão de ar na câmara de referência, com as válvulas 1, 2 e 3 fechadas.  $P_2$  e  $T_2$  são a pressão e a temperatura medida após a abertura da válvula 2, com as a válvula 1 e 3 fechadas.

### 3.4.4 Porosidade

A porosidade ( $\varepsilon$ ) foi calculada utilizando os valores do volume real ( $V_r$ ) e o volume aparente ( $V_{ap}$ ), através da Equação 3.6:

$$\varepsilon(\%) = \left[ 1 - \frac{V_r}{V_{ap}} \right] \cdot 100 \quad (3.6)$$

### 3.4.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As microscopias das amostras foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME)-UFSC. Para as imagens de MEV (Modelo - JEOL JSM 6390LV, Japão), as amostras desidratadas foram recobertas com ouro utilizando um metalizador (LEICA, Modelo - EM SCD500). As imagens capturadas foram da parte interna das amostras fraturadas manualmente e das suas superfícies, sendo realizada uma imagem por processo, com ampliação de 30 vezes para a fratura e 50 vezes para a superfície.

### 3.4.6 Estereoscópio Óptico

As imagens das amostras fraturadas manualmente e das suas superfícies foram obtidas utilizando um estereoscópio óptico (Meiji, Modelo - RZ, Japão), com uma câmera microscópica (OptiCam, Modelo - OPT 10000, Brasil). As imagens foram analisadas com o *software* TSview (Tucsen, V, 7.3.1.7, China).

### 3.4.7 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram determinadas por meio de teste de perfuração em um analisador de textura (Stable Micro System, Modelo

- TA-XT2-Plus, Reino Unido) utilizando uma sonda (*probe*) cilíndrica de 2 mm de diâmetro, velocidade de teste de  $3 \text{ mm s}^{-1}$  e deformação de 70 % da espessura inicial das amostras. Cinco amostras provenientes de um mesmo ensaio foram selecionadas e nelas realizadas três perfurações em diferentes regiões.

As curvas experimentais de força-deformação foram suavizadas por um ajuste não-paramétrico baseado em aproximações com polinômios de segunda ordem, para separar o comportamento global e as oscilações de força (SAVITZKY e GOLAY, 1964). Os resíduos normalizados foram calculados pela diferença entre os dados de força experimentais e ajustados (LAURINDO e PELEG, 2008). Todos os cálculos foram realizados com o *software* Matlab® (Math Works Inc., Modelo - R2017a, Estados Unidos), utilizando a função *sgolayfilt*. A suavização foi realizada para se separar a forma geral da curva das suas oscilações locais. As funções polinomiais de segunda ordem e uma janela com tamanho de 49 pontos experimentais foram escolhidos na função *sgolayfilt* (Matlab) para todos os procedimentos de suavização.

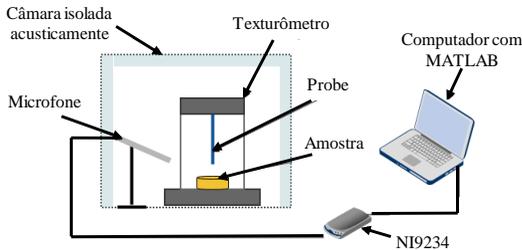
### **3.4.8 Determinação simultânea das propriedades acústicas e mecânicas**

As propriedades acústicas também foram avaliadas durante o ensaio de penetração e foram determinadas utilizando um dispositivo de aquisição de sinal, o conversor National Instruments 9234 (NI 9234) AD com resolução de 24 bits e 102 dB de faixa dinâmica. Os sinais foram capturados por um microfone (G.R.A.S. Sound & Vibration, Modelo G.R.A.S. 46AE  $\frac{1}{2}$ " CCP Free-field Microphone Set, Dinamarca), com sensibilidade de  $52,27 \text{ mV Pa}^{-1}$ , ligado a um pré-amplificador IEPE conectado ao dispositivo de aquisição. A taxa de amostragem foi definida como sendo de 51,2 kHz, que abrange a frequência de audição humana (20 Hz a 20 kHz). O microfone foi posicionado a 5 cm de distância e com um ângulo de  $45^\circ$  em relação à extremidade da sonda mecânica (Figura 3.9).

As curvas resultantes para os dados mecânicos foram expressas como força *versus* tempo, e para os dados acústicos, que foram coletados simultaneamente, foram expressas como nível de pressão sonora (dB) *versus* tempo. Os parâmetros obtidos na análise das propriedades acústicas foram a média do número de picos acústicos (queda no nível de pressão sonora maior que 10 dB), média do nível máximo de pressão sonora ( $SPL_{\text{máx}}$ ) e média do nível de pressão sonora dos dez maiores picos acústicos ( $SPL_{10}$ ). Os parâmetros obtidos relacionados às propriedades

mecânicas foram a média da área abaixo da curva de força *versus* deformação (trabalho total envolvido no teste), a média do número de picos de força (queda do nível de força maior que 0,049 N) e média das forças máximas.

**Figura 3.9** - Equipamento utilizado para a análise instrumental acústico-mecânica das amostras de banana desidratada.



Fonte: Murta et al. (2017).

A aquisição simultânea dos dados de força e acústicos foi realizada durante 17 s. Foram analisadas cinco amostras de cada processo com 3 medições acústicas por amostra.

### 3.4.9 Análise estatística

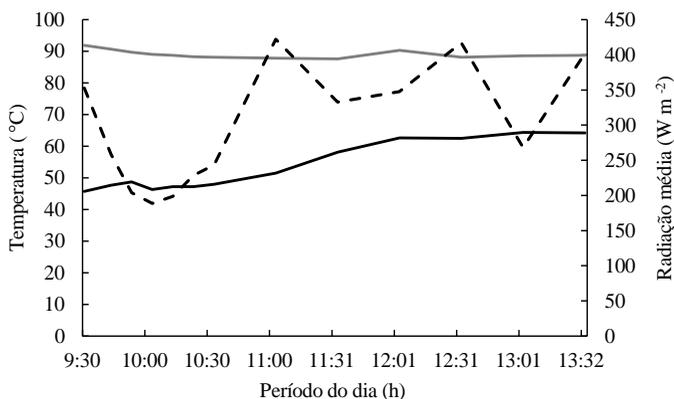
Os resultados experimentais obtidos nas análises de físico-químicas foram analisados estatisticamente com o programa Statistica 7.0 (StatSoft, Tulsa, Estados Unidos) através da análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 95% de confiança ( $p \leq 0,05$ ).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DESEMPENHO DO COLETOR SOLAR DE TUBO EVACUADO

Os experimentos de secagem foram realizados entre os meses de outubro e dezembro de 2018, englobando os períodos da manhã e tarde. Foi utilizado o apoio da resistência elétrica para aquecer a água até 90 °C. Na Figura 4.1 é apresentado o gráfico de evolução da radiação solar média e temperatura da água no interior do coletor solar e do tanque de água durante um experimento de secagem. A figura representa o processo KMFDVD com taxa de descompressão de 19,9 mbar s<sup>-1</sup>, realizado dia 09/11/2018. No Apêndice A constam os gráficos referentes a outros dois processos de secagem. É possível observar que o aumento da radiação ao longo do experimento provoca o aumento da temperatura da água que está no coletor solar. Porém, esse aumento não foi suficiente para que a temperatura de processo (90 °C) fosse atingida.

**Figura 4.1** – Evolução temporal da radiação (- -), da temperatura da água no coletor (—) e da temperatura da água no interior do tanque (—) durante um experimento de secagem no período das 9:30h às 13:30h.



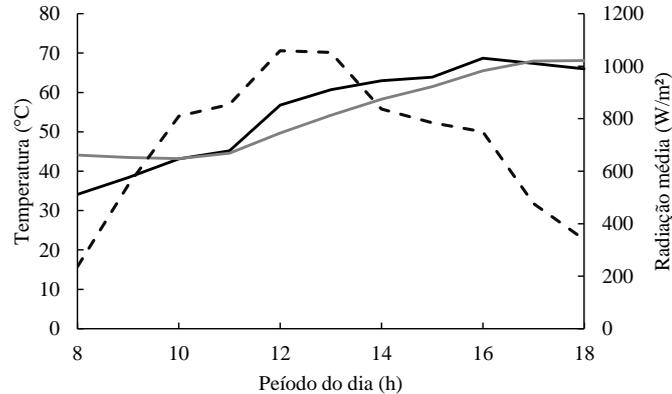
Na Figura 4.2 é apresentada a evolução da radiação solar média, a variação da temperatura da água no interior do coletor solar e do tanque de água ao longo de um dia sem experimento de secagem. Os dados apresentados correspondem ao dia 22/01/2019, quando foi obtida a maior média de radiação solar, entre os dias avaliados, no período das 8h às 18h em Florianópolis. Na Tabela 4.1 são apresentados os valores médios e

máximos da temperatura da água, radiação solar, temperatura ambiente interna e externa obtidos ao longo do dia. No Apêndice A são mostrados os gráficos e tabelas obtidos nos outros dias avaliados.

O coletor solar de tubo evacuado é uma boa opção quando deseje-se trabalhar com temperaturas superiores a 75 °C (MESQUITA, 2013). Da Rosa e colaboradores (2013) compararam a relação da eficiência dos coletores planos e de tubo evacuado com a variação de temperatura entre a água que circula no coletor e o ar ambiente. Eles concluíram que, quando a temperatura desejada para a água for muito maior que a temperatura ambiente, a utilização de um coletor de tubo evacuado é interessante. Apesar disso, com base nos resultados apresentados na Figura 4.2 e Tabela 4.1, é possível observar que mesmo no dia com maior incidência de radiação solar e sem realização de secagem, o coletor solar de tubo evacuado não conseguiu aquecer a água até 90 °C. A temperatura máxima foi atingida no final do dia e foi próxima à 70 °C. Um dos motivos para isso pode estar relacionado à diminuição da eficiência do coletor solar com o aumento da temperatura da água.

Além disso, também ocorre transferência de calor entre a água contida no tanque e o ambiente do laboratório, mantido próximo de 20 °C pelo sistema de condicionamento de ar, onde está o secador. Ainda que o tanque seja isolado nas laterais, a perda de energia é facilitada pela grande área de troca térmica das câmaras (1 m<sup>2</sup>), pela elevada condutividade térmica do alumínio (material de fabricação das câmaras) e pela diferença de temperatura entre a água e o ar.

**Figura 4.2** – Evolução temporal da radiação (- -), da temperatura da água no coletor (—) e da temperatura da água no interior do tanque (—) no dia 22/01/2019 no período das 8h às 18h, sem experimento de secagem.



**Tabela 4.1** – Dados da temperatura da água medida em diferentes partes do sistema, temperatura ambiente e radiação solar coletados no dia 22/01/2019 no período das 8h às 18h.

	Temperatura da água (°C)		Temperatura ambiente (°C)		Radiação Global Média (W m <sup>-2</sup> )
	Tanque	Coletor solar	Interna	Externa	
<b>Média</b>	54,6	55,2	26,2	30,6	704,4
<b>Máxima</b>	68,1	68,7	26,7	34,0	1059,0

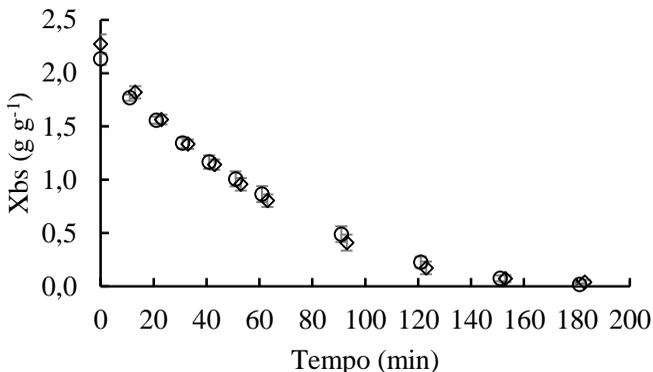
## 4.2 SECAGEM

As amostras de banana utilizadas nesse estudo apresentaram umidade média de  $2,185 \pm 0,109$  (g g<sup>-1</sup>, em base seca),  $a_w$  média de  $0,975 \pm 0,003$  e teor de sólidos solúveis médio de  $25,1 \pm 0,8$  °Brix. Estes valores são próximos aos encontrados por Porciuncula et al. (2015). A tabela com a caracterização das matérias-primas utilizadas em cada processo é mostrada no Apêndice B.

### 4.2.1 Avaliação da secagem

As curvas dos valores médios de umidade *versus* tempo obtidas nas duas replicadas da secagem KMFD são mostradas na Figura 4.3. É possível observar a boa reprodutibilidade do processo, apesar das diferentes taxas de redução da pressão, que não influenciaram as curvas de secagem das amostras de banana.

**Figura 4.3** – Curvas de secagem média com desvio padrão das amostras de banana desidratadas por KMFD com diferentes taxas de descompressão. (◊) KMFD (7,6 mbar s<sup>-1</sup>) e (○) KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>).



Após 180 min os produtos apresentaram umidade média final de  $0,024 \pm 0,028$  g g<sup>-1</sup> (bs) e  $0,024 \pm 0,057$  g g<sup>-1</sup> (bs) e  $a_w$  média final de  $0,263 \pm 0,014$  e  $0,306 \pm 0,023$  para os processos KMFD (7,6 mbar s<sup>-1</sup>) e KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>), respectivamente. Esses valores de  $X_{bs}$  e  $a_w$  estão próximos aos encontrados por Porciuncula (2014), utilizando o processo KMFD com 12 ciclos de aquecimento a 60 °C em uma estufa a vácuo com placas aquecidas por resistências elétricas. O tempo obtido foi de 101 min para secagem de 400 g de banana prata.

A umidade final das amostras localizadas em cada quadrante do secador é mostrada na Figura 4.4. Os valores de umidade apresentados são muito próximos uns aos outros, sendo que para o processo KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>) não houve diferença significativa entre eles.

**Figura 4.4** – Valores médios de umidade (g g<sup>-1</sup> bs) encontrados em cada quadrante das câmaras de secagem. Quadrantes destacados foram pesados o longo do processo. a) KMFD (7,6 mbar s<sup>-1</sup>); b) KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>).

	<b>3.1</b>	<b>3.2</b>	<b>4.1</b>	<b>4.2</b>
	0,026 ± 0,002 <sup>abc</sup>	0,032 ± 0,006 <sup>bc</sup>	0,020 ± 0,001 <sup>ab</sup>	0,026 ± 0,006 <sup>abc</sup>
	<b>3.3</b>	<b>3.4</b>	<b>4.3</b>	<b>4.4</b>
	0,021 ± 0,006 <sup>abc</sup>	0,021 ± 0,003 <sup>ab</sup>	0,026 ± 0,002 <sup>abc</sup>	0,018 ± 0,001 <sup>ab</sup>
a)	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>
	0,021 ± 0,01 <sup>ab</sup>	0,013 ± 0,004 <sup>a</sup>	0,025 ± 0,011 <sup>abc</sup>	0,033 ± 0,011 <sup>bc</sup>
	<b>2.3</b>	<b>2.4</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>
	0,038 ± 0,009 <sup>c</sup>	0,022 ± 0,000 <sup>abc</sup>	0,022 ± 0,007 <sup>ab</sup>	0,017 ± 0,003 <sup>ab</sup>

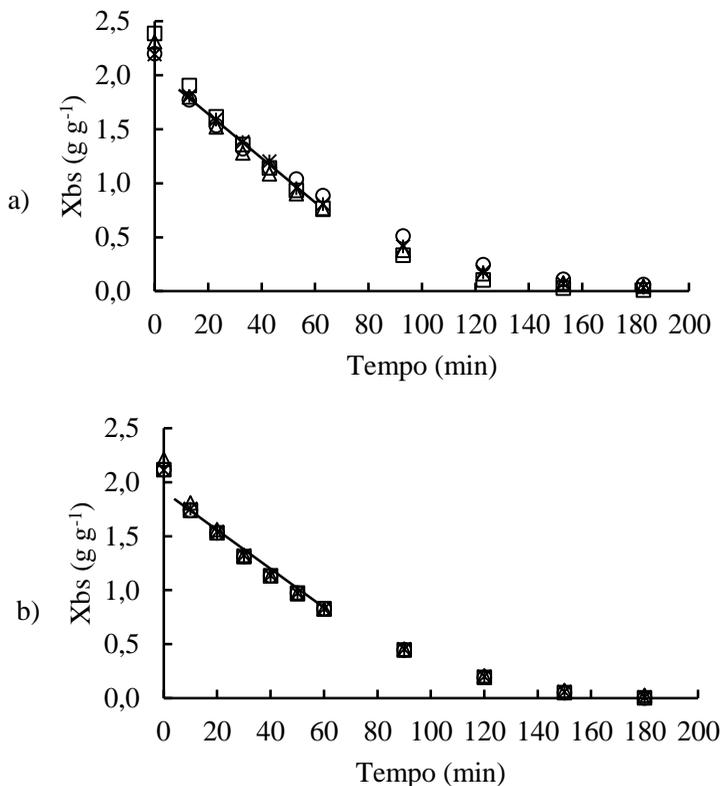
\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

	<b>3.1</b>	<b>3.2</b>	<b>4.1</b>	<b>4.2</b>
	0,015 ± 0,002 <sup>a</sup>	0,008 ± 0,004 <sup>a</sup>	0,023 ± 0,014 <sup>a</sup>	0,009 ± 0,003 <sup>a</sup>
	<b>3.3</b>	<b>3.4</b>	<b>4.3</b>	<b>4.4</b>
	0,022 ± 0,008 <sup>a</sup>	0,006 ± 0,007 <sup>a</sup>	0,006 ± 0,001 <sup>a</sup>	0,027 ± 0,019 <sup>a</sup>
b)	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>
	0,012 ± 0,005 <sup>a</sup>	0,006 ± 0,001 <sup>a</sup>	0,029 ± 0,022 <sup>a</sup>	0,006 ± 0,008 <sup>a</sup>
	<b>2.3</b>	<b>2.4</b>	<b>1.3</b>	<b>1.4</b>
	0,008 ± 0,007 <sup>a</sup>	0,029 ± 0,008 <sup>a</sup>	0,013 ± 0,001 <sup>a</sup>	0,013 ± 0,010 <sup>a</sup>

\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

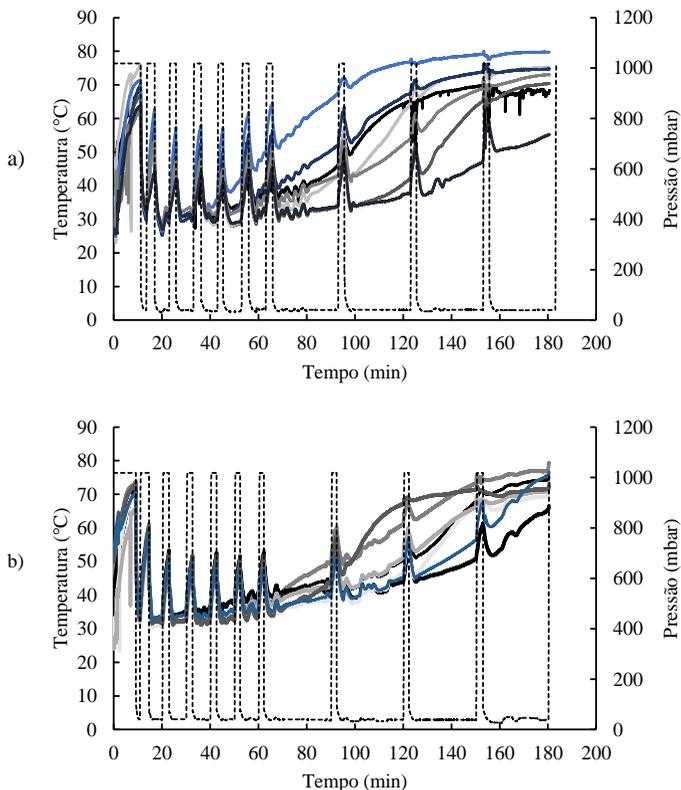
Na Figura 4.5 estão apresentadas as curvas de secagem das bananas desidratadas por KMF D nas diferentes posições das câmaras de secagem. As curvas representadas nesta figura indicam que a secagem ocorreu de maneira homogênea nos diferentes pontos avaliados. A homogeneidade da secagem neste equipamento está relacionada à boa distribuição de temperatura nas superfícies das câmaras de secagem, que garantiu o aquecimento homogêneo das amostras. Isso indica que as chapas de aço inox instaladas no interior do tanque para forçar um caminho de circulação de água e o uso de vapor como fonte de aquecimento das câmaras foi uma escolha adequada.

**Figura 4.5** – Curvas de secagem obtidas em diferentes quadrantes do secador. a) KMFD ( $7,6 \text{ mbar s}^{-1}$ ) e b) KMFD ( $10,3 \text{ mbar s}^{-1}$ ). Os dados experimentais foram representados por pontos e a taxa de secagem durante o período da taxa de secagem constante foi representada por uma linha reta.



A variação temporal da temperatura das fatias de banana e da pressão nos processos KMFD são mostradas na Figura 4.6. É possível observar o aquecimento ( $\approx 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ) das amostras à pressão atmosférica, seguido de uma rápida descompressão do sistema até 40 mbar. A água evapora de forma rápida (evaporação *flash*), provocando o resfriamento do produto até temperaturas próximas de  $29 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura de saturação da água). As temperaturas registradas pelos termopares apresentam diferenças entre si devido às incertezas no posicionamento deles dentro das amostras e deslocamento durante a aplicação do pulso de vácuo.

**Figura 4.6** – Evolução temporal da temperatura do interior das amostras (—) e da pressão (- -), por a) KMFD (7,6 mbar s<sup>-1</sup>) e b) KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>).



Ao analisar as Figuras 4.5 e 4.6 em conjunto, pode-se verificar a existência de dois períodos de secagem (períodos de taxa constante e decrescente). Nos primeiros 60 min de processo observa-se uma maior redução da umidade e as amostras resfriam até a temperatura de saturação da água a 40 mbar, a cada ciclo de aquecimento-pulso de vácuo. Essa etapa é análoga ao período de secagem à taxa constante da secagem convectiva, representado por uma linha reta, obtida por uma regressão linear (Figura 4.5).

A taxa de secagem calculada neste período foi de  $0,018 \text{ g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$  e  $0,020 \text{ g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$  e o coeficiente de correlação  $R^2 = 0,98$  e  $R^2 = 0,97$  para os processos KMFD ( $7,6 \text{ mbar s}^{-1}$ ) e KMFD ( $10,3 \text{ mbar s}^{-1}$ ). Ao final desse período, a umidade crítica estimada foi de aproximadamente  $0,834 \text{ g g}^{-1}$  (bs), representando uma redução de aproximadamente 63% da umidade inicial.

No período de secagem à taxa decrescente a temperatura da amostra aumenta gradualmente, até aproximadamente  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ . O aumento de temperatura ocorre porque a energia recebida pela amostra é maior do que a energia usada para vaporização da água. Resultados similares foram reportados por Zotarelli et al. (2012), Monteiro et al. (2016) e Link et al. (2017).

Após a avaliação de que a secagem ocorreu de maneira homogênea (com relação ao teor de umidade das amostras) nos diferentes pontos do secador, foram realizados experimentos para determinação do tempo de secagem utilizando o processo KMFD com um único pulso de vácuo (KMFDVD) a  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Este processo de secagem foi reportado por Andreani (2018) como sendo o que produziu bananas mais crocantes comparadas às bananas desidratadas por processos KMFD (vários pulsos de vácuo).

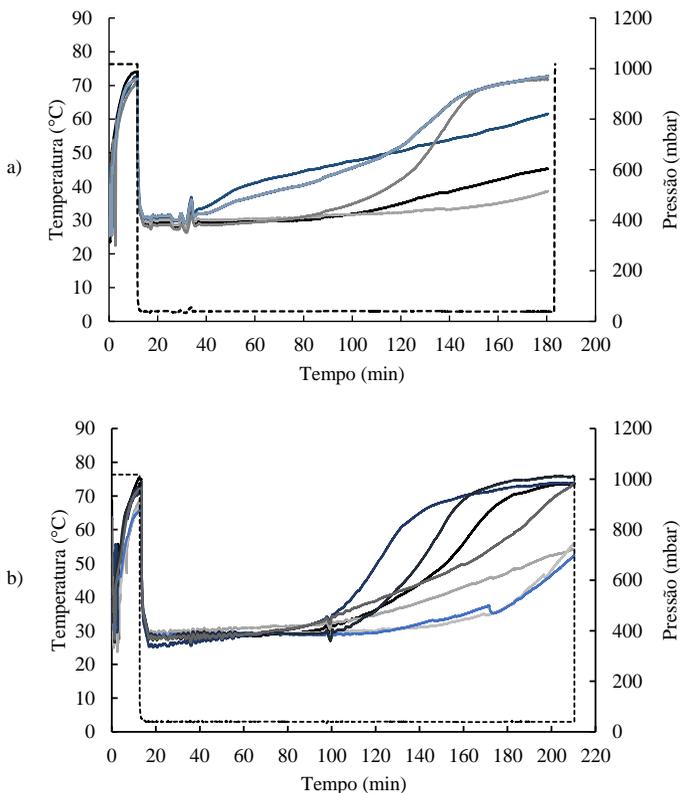
Na Tabela 4.2 são mostrados os valores finais de taxa de descompressão,  $X_{bs}$  e  $a_w$  obtidos em diferentes tempos de secagem.

**Tabela 4.2** – Teor de umidade e atividade de água para bananas desidratadas obtidas por KMFDVD em diferentes tempos de processo.

Processo	Taxa de descompressão ( $\text{mbar s}^{-1}$ )	Umidade ( $\text{g g}^{-1}$ )	$a_w$
KMFDVD (180 min)	10,4	$0,039 \pm 0,029$	$0,287 \pm 0,069$
KMFDVD (210 min)	5,6	$0,025 \pm 0,024$	$0,256 \pm 0,063$

Em ambos experimentos, foram utilizados dois tanques pulmões na descompressão das câmaras de secagem. Apesar disso, as taxas de descompressão obtidas são diferentes devido aos desgastes da vedação do sistema. Na Figura 4.7 estão representados o perfil de variação da temperatura do interior das amostras e da pressão do sistema ao longo da secagem.

**Figura 4.7** – Evolução da temperatura do interior das amostras (—) e da pressão (- -) do sistema ao longo das secagens a) KMFDVD (180 min) e b) KMFDVD (210 min).



A secagem com duração de 180 min e aplicação de 1 pulso de vácuo resultou em bananas desidratadas com umidade final maior do que o valor encontrado para o processo em que foram aplicados 10 pulsos de vácuo, considerando o mesmo tempo de secagem. Na Figura 4.7a, nota-se que a maioria das amostras não atingiu a temperatura final de 75 °C observada nos processos KMFD (7,6 mbar s<sup>-1</sup>) e KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>).

O aumento do tempo de secagem em meia hora (210 min) ocasionou a redução da umidade final, que se aproximou dos valores encontrados nos processos KMFD (7,6 mbar s<sup>-1</sup>) e KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>). Entretanto, após a secagem por KMFDVD (210 min) foram observadas diversas amostras com elevado

teor de umidade ( $0,05 \text{ g g}^{-1} \text{ bs}$ ) e analisando a Figura 4.7b percebe-se que poucas amostras atingiram  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Portanto, para garantir que todas amostras apresentassem teor de umidade próximo ao reportado por Andreani (2018), ou seja  $0,013 \text{ g g}^{-1} \text{ bs}$ , as secagens com diferentes condições de taxa de descompressão tiveram duração de 240 min, que corresponde ao tempo necessário para que a temperatura no interior de todas amostras atingisse  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Esse tempo de secagem é maior que o tempo utilizado no processo anterior com 10 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (3 horas). Segundo Aguilera (2005), a microestrutura do produto tem grande importância quando se trata de fenômenos de transferência de massa em operações como a secagem. Os processos aplicados (KMFD e KMFDVD) resultaram em produtos com microestruturas diferentes e provavelmente com diferentes coeficientes de transferência de calor e massa, levando à alteração dos tempos de secagem. As bananas desidratadas por KMFD têm uma estrutura mais compacta, enquanto que as desidratadas por KMFDVD sofreram maior expansão. A compactação da amostra, diminui a resistência à transferência de calor, reduzindo os tempos de secagem. As microestruturas geradas pelos processos serão discutidas no decorrer do texto.

#### 4.2.2 Avaliação da taxa de descompressão

Na Tabela 4.3 são mostradas as taxas de descompressão encontradas para diferentes configurações do sistema de secagem. Na Figura 4.8 está representado o perfil de variação temporal da pressão no momento do pulso de vácuo para as diferentes taxas estudadas.

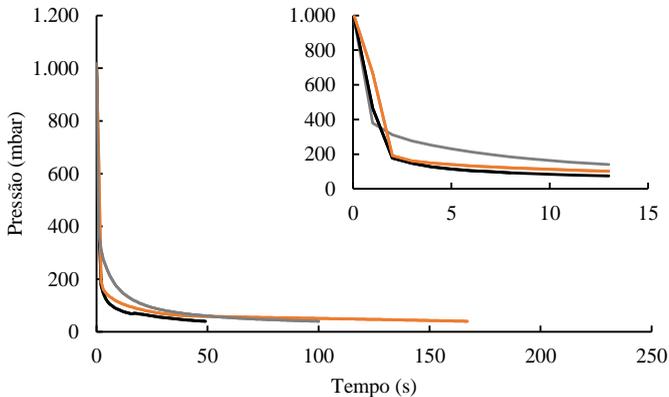
A principal diferença entre as configurações adotadas está no volume de armazenamento de vácuo. Espera-se que quanto maior o volume armazenado, maior seja a taxa de descompressão obtida.

**Tabela 4.3** – Taxas de descompressão obtidas para cada configuração do sistema de secagem.

Configuração	Taxa de descompressão ( $\text{mbar s}^{-1}$ )
Dois tanques pulmões + condensador	19,9
Um tanque pulmão + condensador	5,9
Apenas condensador	9,8

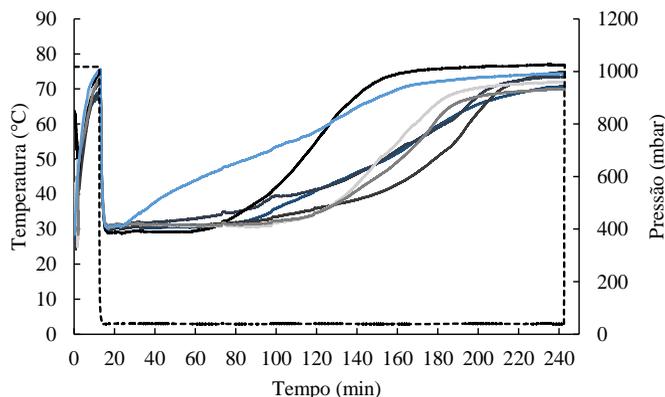
Quando o sistema foi operado utilizando dois tanques pulmões + condensador, obteve-se a maior taxa de descompressão. Entretanto, a taxa obtida utilizando apenas o condensador foi maior do que a obtida utilizando um tanque pulmão + condensador. Possivelmente, isso está relacionado aos problemas de vedação das câmaras de secagem, devido aos desgastes causados pelo uso constante.

**Figura 4.8** – Perfil de variação da pressão *versus* tempo para as diferentes taxas de descompressão avaliadas. (—) KMFDVD ( $5,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ); (—) KMFDVD ( $9,8 \text{ mbar s}^{-1}$ ); (—) KMFDVD ( $19,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ).



Não foi possível a obtenção das curvas de variação temporal da umidade para cada taxa estudada devido à dificuldade de se fixar a taxa de descompressão. O perfil representativo da variação temporal da temperatura das fatias de banana e da pressão durante os processos KMFD avaliados é mostrado na Figura 4.9 e no Apêndice C.

**Figura 4.9** – Perfil representativo da evolução temporal da temperatura do interior das amostras (—) e da pressão (- -) para o processo KMFDVD 9,8 mbar s<sup>-1</sup>.



Na Figura 4.9 é possível observar que a evaporação *flash*, após a aplicação do pulso de vácuo, provoca a diminuição da temperatura das amostras até 30 °C. A temperatura se mantém constante por aproximadamente 80 min, sendo esse o período de secagem à taxa constante. Nos últimos 40 min de processo, a temperatura das amostras se mantém em torno de 75 °C, garantindo valores de umidade próximos aos encontrados nos processos KMFD ( $\approx$  2% bs).

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores médios de umidade (b.s.) e atividade de água das bananas desidratadas utilizando as diferentes taxas de descompressão.

**Tabela 4.4** - Teor de umidade final ( $X_{bs}$ ) e atividade de água ( $a_w$  final) das bananas desidratadas utilizando diferentes taxas de descompressão.

Processo	$X_{bs}$ final (g g <sup>-1</sup> )	$a_w$ final
KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> )	0,013 ± 0,004 <sup>a</sup>	0,205 ± 0,018 <sup>a</sup>
KMFDVD (9,8 mbar s <sup>-1</sup> )	0,016 ± 0,006 <sup>b</sup>	0,213 ± 0,017 <sup>a</sup>
KMFDVD (19,9 mbar s <sup>-1</sup> )	0,018 ± 0,008 <sup>b</sup>	0,245 ± 0,017 <sup>b</sup>

\*Letras diferentes na mesma coluna representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

Os valores obtidos são muito próximos uns dos outros, tanto para umidade quanto para atividade de água, e corroboram com os encontrados por Andreani (2018) no processo de secagem KMFD com aplicação de um pulso de vácuo e temperatura de aquecimento até 70 °C. Andreani desidratou bananas em estufa a vácuo mantendo placas aquecidas a 90 °C

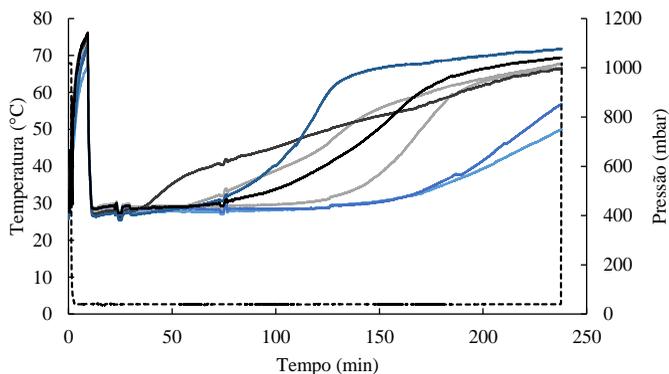
com resistências elétricas, por 162 min. A diferença de tempo pode estar relacionada à quantidade de massa desidratada e também ao melhor isolamento térmico da estufa a vácuo.

### 4.2.3 Secagem sem apoio elétrico contínuo

No mês de janeiro de 2019, período com elevada incidência de radiação solar, foi realizada a secagem sem apoio elétrico contínuo (KMFDVD\_SOLAR). A secagem KMFDVD\_SOLAR foi realizada por 4 horas e os produtos obtidos apresentaram  $X_{bs}$  igual a  $0,039 \pm 0,048 \text{ g g}^{-1}$  e  $a_w$  de  $0,285 \pm 0,028$ . Esses valores são maiores do que os encontrados para os processos mostrados na Tabela 4.4.

Na Figura 4.10 é apresentado o perfil representativo da variação temporal da temperatura das fatias de banana e da pressão no processo KMFDVD\_SOLAR. É possível notar que aos 240 min de secagem as amostras ainda não haviam atingido  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ , portanto era esperado encontrar valores mais altos tanto de umidade quanto de atividade de água..

**Figura 4.10** – Evolução temporal da temperatura do interior das amostras de banana (—) e da pressão (- -) desidratadas por KMFDVD\_SOLAR.



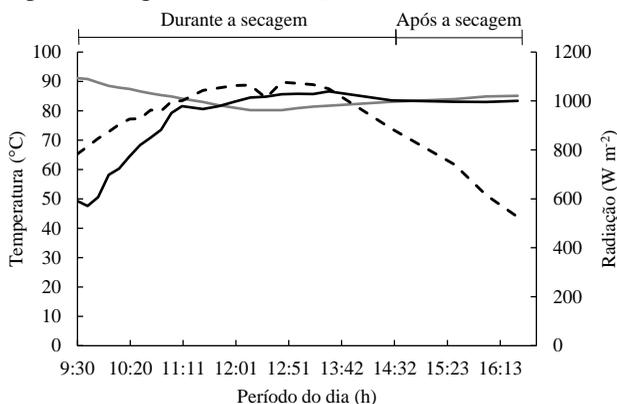
Na Figura 4.11 é apresentado o gráfico de evolução da radiação solar média e temperatura da água no interior do coletor solar e do tanque de água durante este experimento de secagem. Analisando o gráfico, observa-se a queda da temperatura da água ao longo da secagem, explicando porque a temperatura da amostra não atingiu  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  no final do processo. Assim que a resistência elétrica foi desligada, as amostras

foram colocadas no secador e a temperatura inicial da água no tanque localizado abaixo das câmaras de secagem era de 91,1 °C. Em 150 min de secagem, a temperatura da água no tanque diminuiu em 10 °C e a temperatura da água no coletor aumentou aproximadamente 34 °C. O aumento da temperatura da água no coletor está relacionado à elevada radiação solar no período, que teve um pico de 1065 W m<sup>-2</sup> aos 165 min de processo.

O coletor contribuiu para manter as temperaturas aproximadamente constantes nos últimos 90 min de secagem. Isso ocorre porque a demanda de energia térmica no final do processo é menor devido a menor taxa de secagem. Além disso, a água circula entre o coletor e o tanque através das bombas de circulação que são ativadas por diferencial de temperatura. Portanto, a água que circulava do tanque em direção ao coletor já estava em uma temperatura alta (próxima aos 80 °C).

Após a secagem, as temperaturas da água do coletor e do tanque se mantiveram constantes e aproximadamente iguais. Por estar com uma temperatura maior, o coletor continuou enviando água para o tanque até que suas temperaturas se equilibrassem. Além disso, nesse período é possível observar queda na radiação solar, que não favoreceu o aumento da temperatura da água.

**Figura 4.11** – Evolução temporal da radiação (- -), da temperatura da água no coletor (—) e da temperatura da água no interior do tanque (—) durante e após a secagem KMFDVD\_SOLAR.



### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DESIDRATADAS

A Tabela 4.5 mostra o resultado das análises de umidade e atividade de água das bananas desidratadas obtidas pelos diferentes métodos de secagem e que foram acondicionadas por 7 dias em UR = 24,6%.

As amostras acondicionadas apresentaram a mesma atividade de água independente do processo de secagem utilizado, indicando que o tempo de condicionamento foi suficiente para o equilíbrio termodinâmico. Os valores de umidade para as bananas desidratadas por KMFD (7,6 mbar s<sup>-1</sup>) e KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>) são estatisticamente iguais e são maiores do que os valores de umidade obtidos nos outros processos.

As propriedades estruturais dos alimentos são significativamente dependentes da natureza do material e das condições de secagem, além de influenciarem a opinião do consumidor (MADIOULI et al., 2007; MADIOULI et al, 2012). Portanto, é importante conhecer como o processo de secagem afeta as propriedades físicas, como massa específica aparente, porosidade e textura.

**Tabela 4.5** - Teor de umidade e atividade de água das amostras acondicionadas em UR = 24,6%

Processo de secagem	$X_{bs}$ (g g <sup>-1</sup> )	Aw
KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> )	0,036 ± 0,003 <sup>a</sup>	0,307 ± 0,003 <sup>a</sup>
KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> )	0,030 ± 0,001 <sup>ab</sup>	0,302 ± 0,002 <sup>a</sup>
KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> )	0,019 ± 0,003 <sup>c</sup>	0,293 ± 0,004 <sup>a</sup>
KMFDVD (9,8 mbar s <sup>-1</sup> )	0,015 ± 0,001 <sup>bc</sup>	0,303 ± 0,006 <sup>a</sup>
KMFDVD (19,9 mbar s <sup>-1</sup> )	0,022 ± 0,006 <sup>c</sup>	0,297 ± 0,004 <sup>a</sup>

\*Letras diferentes na mesma coluna representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

#### 4.3.1 Massa específica aparente, porosidade e microestrutura

Os resultados obtidos para porosidade ( $\epsilon$ ) e massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ) das amostras de banana secas pelos métodos KMFD e KMFDVD são mostrados na Tabela 4.6.

A taxa de decompressão do sistema não influenciou a massa específica aparente e porosidade das amostras desidratadas por KMFD e por KMFDVD. Este resultado corrobora os resultados relatados por Link et al. (2018), que não constatou diferença significativa nas porosidades encontradas para amostras de manga submetidas ao processo KMFD, aplicando diferentes taxas de redução de pressão.

**Tabela 4.6** - Porosidade e massa específica aparente das bananas secas utilizando diferentes taxas de descompressão.

Processo de secagem	$\varepsilon$ (%)	$\rho_{ap}$ (g cm <sup>-3</sup> )
KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> )	52,6 ± 4,7 <sup>a*</sup>	0,768 ± 0,030 <sup>a</sup>
KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> )	53,3 ± 5,1 <sup>a</sup>	0,833 ± 0,094 <sup>a</sup>
KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> )	63,7 ± 2,2 <sup>b</sup>	0,547 ± 0,054 <sup>b</sup>
KMFDVD (9,8 mbar s <sup>-1</sup> )	69,5 ± 1,3 <sup>b</sup>	0,503 ± 0,024 <sup>b</sup>
KMFDVD (19,9 mbar s <sup>-1</sup> )	62,4 ± 3,0 <sup>b</sup>	0,577 ± 0,072 <sup>b</sup>

\*Letras diferentes na mesma coluna representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

As amostras desidratadas com a aplicação de apenas um pulso de vácuo (KMFDVD) apresentaram maiores valores de porosidade e menores valores de massa específica aparente, resultado que corrobora com o encontrado por Andreani (2018). Porciuncula et al. (2016) constatou que as amostras de banana prata desidratadas por KMFD com aplicação de 12 pulsos de vácuo sofreram um encolhimento maior e apresentaram menor porosidade do que as amostras desidratadas por KMFDVD com aplicação de 3 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo seguido por uma secagem à vácuo.

A rápida descompressão do sistema induz uma evaporação parcial da água do produto, sendo que a quantidade de vapor gerado está diretamente relacionada à diferença de temperatura entre os dois estágios, antes e depois da descompressão (LOUKA e ALAF, 2002; ZOTARELLI et al., 2012; PORCIUNCULA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016). Além disso, o vapor gerado a 40 mbar apresenta um volume específico alto (34,79 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>) em comparação ao vapor à pressão atmosférica (1,66 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>). Seu fluxo do interior para a superfície do material provoca a deformação da estrutura, gerando um novo espaço poroso. A manutenção da estrutura expandida depende do enrijecimento do produto, que é determinada pela temperatura e pelo teor de água (LOUKA e ALLAF, 2002; ZOTARELLI et al., 2012; PORCIUNCULA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016).

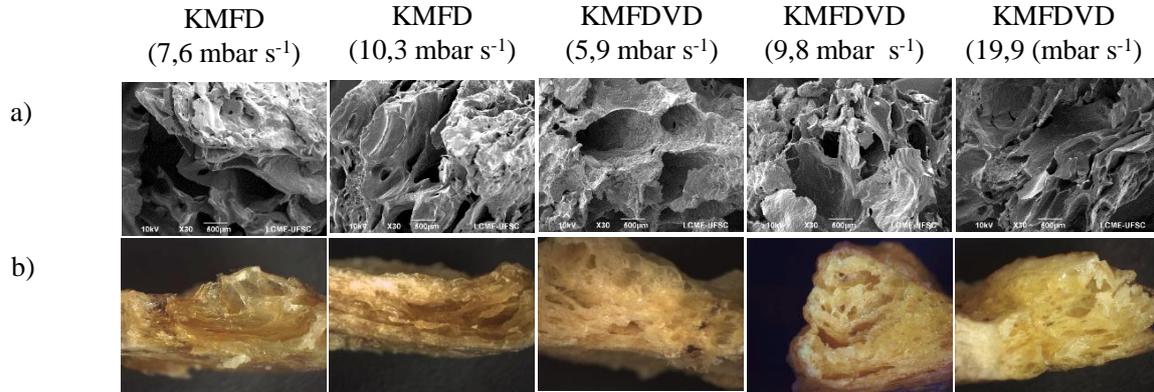
Na Figura 4.12 são apresentadas as imagens de MEV e microscopia ótica das fraturas manuais das fatias de banana e na Figura 4.13 as imagens de MEV, microscopia ótica e fotografia da superfície das frutas desidratadas por KMFD e KMFDVD com diferentes taxas de descompressão.

As amostras produzidas pelo processo KMFD com a aplicação de 10 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo apresentam uma estrutura mais

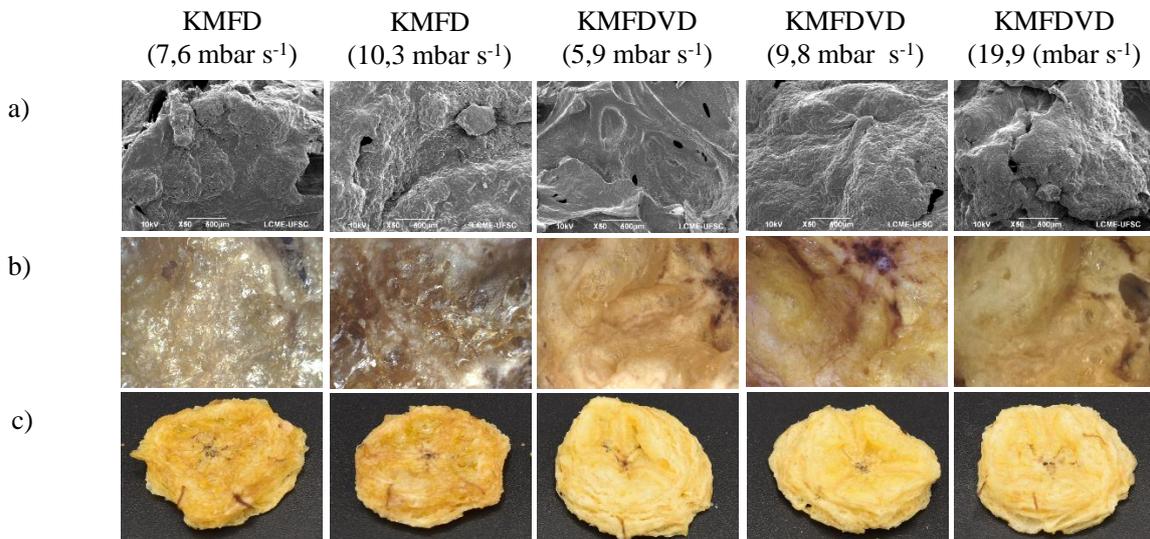
compacta, que, provavelmente, está relacionada à compressão e descompressão do sistema. No início do processo há elevado teor de umidade, o que gera maior quantidade de vapor, provocando a expansão da amostra. Ao passar do tempo ocorre o aumento da pressão capilar e a diminuição da quantidade de vapor gerado a cada pulso, provocando menor expansão da estrutura. Por outro lado, no processo KMFDVD a aplicação de apenas um pulso de vácuo permitiu que a estrutura da amostra apresentasse uma matriz porosa mais expandida, com poros grandes e bem distribuídos. Esse resultado corrobora os resultados de porosidade e massa específica aparente. Resultados similares foram encontrados por Andreani (2018).

As fotografias mostradas na Figura 4.13 indicam que as bananas desidratadas por KMFD apresentaram alteração visual da cor durante o processo de secagem. Estas amostras sofreram maior escurecimento devido às maiores temperaturas de processo a que foram expostas durante a aplicação dos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. As bananas desidratadas por KMFDVD apresentaram menor alteração visual de cor e superfícies semelhantes tanto na aparência quanto na cor.

**Figura 4.12** – Imagens das fraturas das amostras de banana desidratada obtidas por a) MEV (aumento de x30) e b) microscopia ótica.



**Figura 4.13** – Imagens das superfícies das amostras de banana desidratada obtidas por a) MEV (aumento de x50); b) microscopia ótica e c) fotografia.



### 4.3.2 Propriedades mecânicas

Na Figura 4.14 são apresentadas as curvas de força - deformação resultantes dos testes mecânicos de perfuração, realizados com amostras desidratadas por KMFD e KMFDVD, submetidas a diferentes taxas de descompressão do sistema. A Figura 4.14 também apresenta as curvas suavizadas, que representam o comportamento global da força - deformação, bem como os resíduos normalizados calculados pela diferença entre a força registrada e a força ajustada. As replicatas destas curvas constam no Apêndice D.

A crocância das amostras pode ser relacionada com as irregularidades das curvas de força - deformação e com o número de picos e as amplitudes dos picos nas curvas de resíduos (LAURINDO e PELEG, 2007; LAURINDO e PELEG, 2008). Essas irregularidades são consequência das fraturas resultantes da penetração da *probe* na amostra.

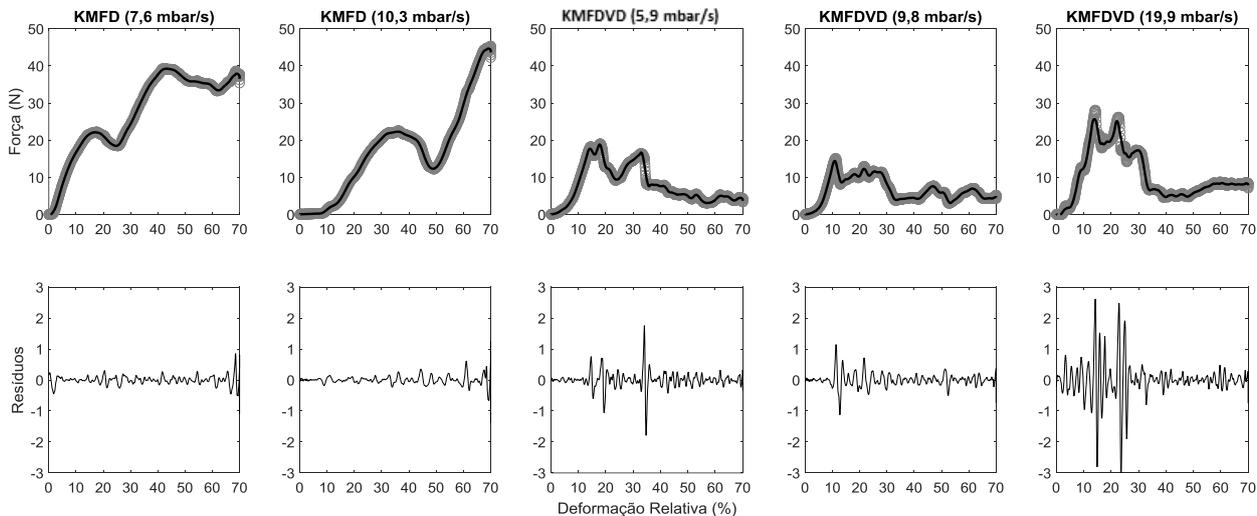
As curvas obtidas para as duas taxas de descompressão avaliadas no processo KMFD com 10 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo são muito semelhantes e apresentam poucas irregularidades, resultado de sua estrutura crocante com pequenos poros. Estas amostras apresentaram um maior aumento da força com a distância de penetração, característica de amostras mais compactas e rígidas.

Os produtos obtidos por KMFDVD apresentam curvas de força - deformação com maiores irregularidades, comportamento de um produto crocante com estrutura porosa. As curvas de resíduos apresentaram picos com maior amplitude.

A curva de resíduos da banana desidratada com maior taxa de descompressão (KMFDVD -  $19,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ) foi a que apresentou maiores números de picos com alta amplitude. Já as taxas de  $5,9 \text{ mbar s}^{-1}$  e  $9,8 \text{ mbar s}^{-1}$  resultaram em curvas de força-deformação e de resíduos semelhantes.

Para melhor correlacionar a crocância das amostras com a taxa de descompressão, foram realizados os testes acústicos-mecânicos propostos por Andreani (2018). Estudos tem reportado boas correlações entre propriedades mecânicas, acústicas e sensoriais (Andreani, 2018; Monteiro, 2018).

**Figura 4.14** – Gráficos representativos da oscilação da força em função da deformação dos testes de penetração das amostras de banana desidratadas por diferentes métodos de secagem. Linha superior: Dados de força-deformação (○) e ajuste não-paramétrico (—); Linha inferior: curvas dos resíduos.



### 4.3.3 Propriedades acústico-mecânicas

Na Figura 4.15 são mostradas as curvas representativas de força de deformação *versus* tempo e *SPL* (nível de pressão sonora) *versus* tempo, para os testes acústicos e mecânicos realizados simultaneamente com amostras de banana desidratadas por KMFD e KMFDVD, utilizando diferentes taxas de descompressão. No Apêndice E encontram-se duas replicatas destas curvas. Os sinais mecânicos e sonoros emitidos durante o teste de perfuração foram sincronizados, permitindo a comparação simultânea dos dados mecânicos e acústicos.

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores médios e desvios padrões dos parâmetros obtidos nos testes acústico-mecânico, para amostras secas pelos diferentes processos de secagem.

Os gráficos mostrados nas imagens (a) e (b) da Figura 4.15, correspondentes ao processo KMFD, apresentam menores picos mecânicos e acústicos, quando comparados aos dos processos KMFDVD.

O trabalho realizado para perfurar as amostras desidratadas por KMFD foi muito maior do que o realizado no teste de perfuração das amostras desidratadas por KMFDVD. Isso é indicado pela área sob curva força *versus* tempo. Além disso, as bananas desidratadas por KMFD também obtiveram os maiores valores de força máxima, indicando que essas amostras possuem maior resistência mecânica, associada à dureza percebida por painelistas não treinados em análises sensoriais (PELEG, 2006).

O número de picos de força e o número de picos acústicos para as amostras desidratadas por KMFD são iguais estatisticamente e menores do que os valores encontrados para as amostras desidratadas por KMFDVD com as taxas  $5,9 \text{ mbar s}^{-1}$  e  $19,9 \text{ mbar s}^{-1}$ .

As curvas acústicas e mecânicas das amostras desidratadas por KMFDVD com diferentes taxas de descompressão (imagens *c*, *d* e *e* da Figura 4.15) apontam a presença de uma estrutura porosa, um atributo de produtos crocantes. Independente da taxa de redução de pressão aplicada, os valores de  $SPL_{m\acute{a}x}$ ,  $SPL_{10}$  e da área abaixo da curva são muito próximos e a análise estatística indicou que não houve diferença para estas amostras. Estes parâmetros acústicos também são relacionados à crocância dos produtos.

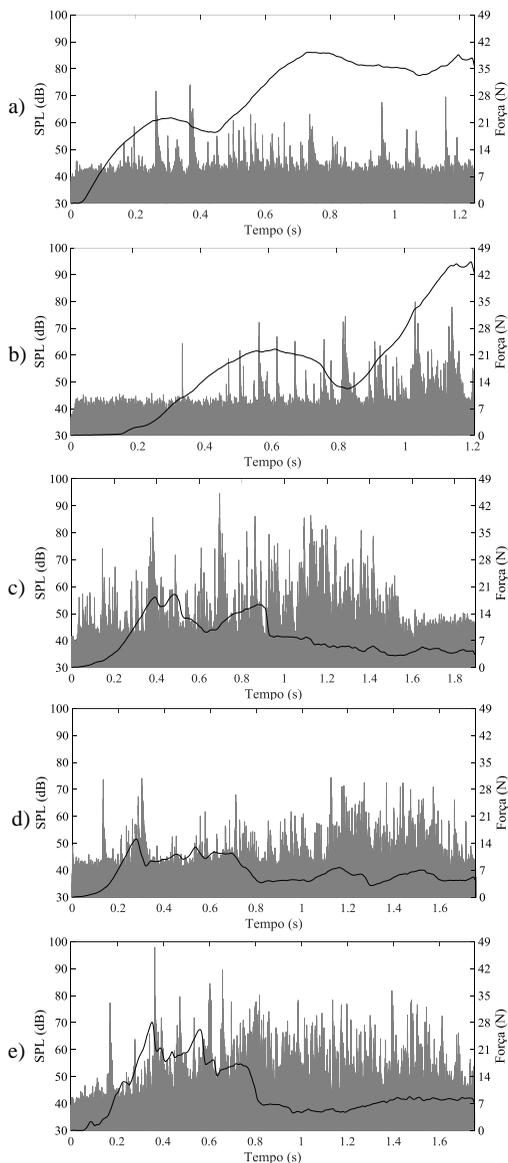
As bananas desidratadas por KMFDVD ( $5,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ) e KMFDVD ( $19,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ) apresentaram valores estatisticamente iguais ( $p \leq 0,05$ ) tanto para número de picos acústicos quanto para número de picos mecânicos. A taxa de descompressão de  $19,9 \text{ mbar s}^{-1}$  foi atingida utilizando 2 tanques pulmões, enquanto a taxa de  $5,9 \text{ mbar s}^{-1}$  foi atingida

utilizando 1 tanque pulmão. No entanto, nota-se uma tendência do aumento do número de picos acústicos com o aumento do volume do reservatório de vácuo utilizado para aplicação do pulso. Dessa forma, foi realizada uma nova análise estatística para verificar se existe diferença estatística a nível de 10% de significância.

Os resultados obtidos são mostrados na tabela do Apêndice F. Houve diferença significativa ( $p \leq 0,1$ ) entre o número de picos acústicos obtidos no teste de perfuração das amostras de banana desidratada por KMFDVD ( $19,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ) e KMFDVD ( $5,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ). Porém, não houve diferença entre os resultados obtidos para os produtos secos por KMFDVD ( $5,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ) e KMFDVD ( $9,8 \text{ mbar s}^{-1}$ ).

Portanto, isso indica que a taxa de descompressão na faixa estudada não influenciou as propriedades acústicas e mecânicas das bananas desidratadas.

**Figura 4.15-** Evolução da Força aplicada (—) e nível de Pressão Sonoro (SPL) (—) versus o tempo de penetração das amostras: a) KMFD (7,6 mbar s<sup>-1</sup>); b) KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>); c) KMFDVD (5,9 mbar s<sup>-1</sup>); d) KMFDVD (9,8 mbar s<sup>-1</sup>); e) KMFDVD (19,9 mbar s<sup>-1</sup>).



**Tabela 4.7** - Valores médios e desvios padrões dos parâmetros obtidos nos testes acústico-mecânico, para amostras secas pelos diferentes processos de secagem.

Processo de secagem	Parâmetros instrumentais mecânicos			Parâmetros instrumentais acústicos		
	Área (N.mm)	Número de picos de força	Força máxima (N)	$SPL_{10}$ (dB)	$SPL_{máx}$ (dB)	Número de picos acústicos
KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> )	1494,9 ± 725,9 <sup>a*</sup>	8 ± 3 <sup>a</sup>	38,2 ± 18,3 <sup>a</sup>	79,0 ± 5,1 <sup>a</sup>	85,7 ± 5,8 <sup>a</sup>	887 ± 706 <sup>a</sup>
KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> )	1451,4 ± 918,8 <sup>a</sup>	7 ± 2 <sup>a</sup>	41,6 ± 20,8 <sup>a</sup>	80,1 ± 7,9 <sup>a</sup>	87,4 ± 8,8 <sup>a</sup>	616 ± 349 <sup>a</sup>
KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> )	487,0 ± 139,3 <sup>b</sup>	18 ± 5 <sup>b</sup>	17,1 ± 7,8 <sup>b</sup>	83,8 ± 6,3 <sup>a</sup>	89,4 ± 7,1 <sup>a</sup>	2082 ± 1352 <sup>bc</sup>
KMFDVD (9,8 mbar s <sup>-1</sup> )	429,4 ± 144,3 <sup>b</sup>	18 ± 4 <sup>b</sup>	14,2 ± 6,7 <sup>b</sup>	79,8 ± 5,1 <sup>a</sup>	84,6 ± 6,3 <sup>a</sup>	1637 ± 606 <sup>ab</sup>
KMFDVD (19,9 mbar s <sup>-1</sup> )	722,1 ± 408,0 <sup>b</sup>	21 ± 6 <sup>b</sup>	27,5 ± 13,5 <sup>ab</sup>	85,3 ± 8,3 <sup>a</sup>	89,7 ± 9,4 <sup>a</sup>	3047 ± 1623 <sup>c</sup>

\*Letras diferentes na mesma coluna representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

## 5 CONCLUSÃO

O secador solar híbrido que opera a vácuo é uma boa alternativa para produção de bananas desidratadas crocantes através do processo KMFD, utilizando energia solar térmica e energia elétrica.

O coletor solar de tubo evacuado não conseguiu suprir a demanda de energia térmica do sistema na região de Florianópolis, com os coletores utilizados. Um redimensionamento é necessário para que o secador funcione sem apoio elétrico. Por outro lado, o uso de painéis fotovoltaicos é uma alternativa sustentável para geração de energia elétrica necessária para o funcionamento da resistência e aquecimento da água. Além disso, a secagem realizada sem apoio elétrico contínuo é uma opção viável em regiões de alta irradiação, podendo contribuir para reduzir tanto os custos de energia quanto as emissões de gases do efeito estufa.

A desidratação pode ser feita de forma homogênea e as amostras de banana desidratadas pelo processo KMFDVD (com a aplicação de apenas um pulso de vácuo) apresentam baixos valores de umidade e atividade de água e elevada porosidade, independentemente das taxas de descompressão utilizadas. As irregularidades e os diversos picos de força encontrados nas curvas de força-deformação indicam que a banana produzida apresenta elevada crocância, corroborando com os resultados dos parâmetros acústicos avaliados.

Tendo em vista que as taxas de descompressão utilizadas não influenciaram as propriedades estruturais das bananas desidratadas, pode-se operar o equipamento utilizando apenas o condensador e a bomba de vácuo para aplicação dos pulsos de vácuo. Isso reduz os custos de montagem do equipamento e também a área ocupada por ele.

Considerando que o sistema é de fácil operação e que é possível utilizar o processo KMFD, o equipamento tem potencial para ser instalado em propriedades rurais para produção de frutas e hortaliças crocantes em pequena escala. Assim, é possível agregar valor à matéria-prima agropecuária, aumentando a vida útil de frutas e hortaliças e contribuindo com a redução de desperdícios na cadeia produtiva de alimentos.



## SUGESTÕES DE MELHORIA DO EQUIPAMENTO

- Modificar as vedações das câmaras de secagem para garantir maior isolamento do vácuo;
- Posicionar as amostras diretamente em finas chapas metálicas revestidas com Teflon ® ou outro material antiaderente. Os filmes de Teflon ® deformam-se com o tempo, podendo dificultar o contato da amostra com a chapa aquecida;
- Avaliar a possibilidade de utilizar tampas mais leves e de fácil manipulação que permitam a passagem da radiação solar;
- Diminuir o número de conexões com rosca e utilizar conexões do tipo *tri – clamp* (TC) para evitar pontos de vazamento.



## SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

- Estudar a secagem de outras frutas e hortaliças por KMFD no equipamento desenvolvido;
- Analisar o consumo energético e a viabilidade de utilização de painéis fotovoltaicos ou o aumento do número de coletores solares de tubo evacuado;
- Analisar a viabilidade econômica do sistema de secagem solar;
- Estudar um sistema de condensação de vapor de baixo custo e baixo consumo energético;
- Estudar a influência da radiação solar direta na secagem de frutas e hortaliças por KMFD no equipamento desenvolvido;
- Estudar a influência de maiores taxas de descompressão na secagem de frutas por KMFD;
- Avaliar o uso do equipamento em outras regiões do país.



## REFERÊNCIAS

- ALIBAS, I. Energy Consumption and Color Characteristics of Nettle Leaves during Microwave, Vacuum and Convective Drying. **Biosystems Engineering**, v. 96, p. 495–502, 2007.
- AMAN, M. M. et al. A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1190-1204, 2015.
- AMER, B. M. A.; HOSSAIN, M. A.; GOTTSCHALK, K. Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. **Energy conversion and management**, v. 51, n. 4, p. 813-820, 2010.
- ANDREANI, P. **Medidas simultâneas mecânicas e acústicas e correlações sensoriais para alimentos crocantes**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.
- AOAC, Official Methods of Analysis, Association of Official Analytical Chemists, Washington, 2005.
- AUGUSTIN, M. A. et al. Role of food processing in food and nutrition security. **Trends in Food Science & Technology**, v. 56, p. 115-125, 2016.
- BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Solar drying. **Solar energy**, v. 85, n. 8, p. 1665-1691, 2011.
- CEPLAC. **Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira**. Banana. Disponível em: <<http://www.ceplac.gov.br/radar/banana.htm>> Acessado em 01 junho de 2018.
- ČIPLIENĖ, A.; NOVOŠINSKAS, H.; RAILA, A.; ZVICEVIČIUS, E. Usage of hybrid solar collector system in drying technologies of medical plants. **Energy Conversion and Management**, v. 93, p. 399-405, 2015.
- CHAMP, M., KOZLOWSKI, F., LECANNU, G. *In vivo* and *In vitro* methods for resistant starch measurement. In: MCCLEARY, V.

PROSKY, L. **Advanced dietary fibre technology**. Oxford: Blackwell Science, 2001.

CHEN, X.D.; MUJUMDAR, A.S. **Drying Technologies in Food Processing**. 1 ed., Oxford: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

CONDORÍ, M.; DURAN, G.; ECHAZÚ, R.; ALTOBELLI, F. Semi-industrial drying of vegetables using an array of large solar air collectors. **Energy for Sustainable Development**, v. 37, p. 1-9, 2017.

DA ROSA, F. N.; MANEA, T. F.; KREZNINGER, A. Estudo comparativo da utilização de coletores solares planos e tubulares para aquecimento de água. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 4, n. 2, 2013.

ELLABBAN, O.; ABU-RUB, H.; BLAABJERG, F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 748-764, 2014.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. A cultura da banana. Coleção Plantar, vol. 56. 3. ed. Brasília: 2006. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/120874/a-cultura-da-banana> > Acessado em 01 de junho de 2018.

EPAGRI/CEPA. **Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina / Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola**. Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina 2016-2017. Florianópolis. Disponível em: [http://docweb.epagri.sc.gov.br/website\\_cepa/publicacoes/Sintese-Anual-da-Agricultura-SC\\_2016\\_17.pdf](http://docweb.epagri.sc.gov.br/website_cepa/publicacoes/Sintese-Anual-da-Agricultura-SC_2016_17.pdf) Acessado em 01 de junho de 2018.

ESPER, A.; MÜHLBAUER, W. Solar drying—an effective means of food preservation. **Renewable Energy**, v. 15, n. 1-4, p. 95-100, 1998.

ESWARA, A. R.; RAMAKRISHNARAO, M. Solar energy in food processing—a critical appraisal. **Journal of food science and technology**, v. 50, n. 2, p. 209-227, 2013.

FAO. **Food and Agricultural Organization of The United Nations**. Banana facts and figures. Disponível em: <<http://www>.

[fao.org/economic/est/est-commodities/bananas/bananafacts/en/#.WxRZf-4v zIV](http://fao.org/economic/est/est-commodities/bananas/bananafacts/en/#.WxRZf-4v zIV) > Acessado em: 01 junho de 2018.

FASOLIN, L.H.; ALMEIDA, G. C. de; CASTANHO, P. S.; NETTO-OLIVEIRA, E. R. Biscoitos produzidos com farinha de banana: avaliações química, física e sensorial. **Ciênc. Tecnol. Aliment.** v. 27, n. 3, p. 524-529, 2007.

FELLOWS, P. **Food Processing Technology - Principles and Practice**. 2°. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2000.

GARNETT, T. Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)?. **Food policy**, v. 36, p. S23-S32, 2011.

GEANKOPLIS, C.J. **Transport Processes and Unit Operations**, 3 ed., New Jersey: Inc. Prentice Hall, 1998.

GOULART JUNIOR, R; MONDARDO, M.; REITER, J.M.W. **Relatório de projeto: LF 2015/16 - Análise comparativa das principais frutas nas safras 2014/15 e 2015/16**. Florianópolis: Epagri, 2017 (Relatório). Disponível em: <[http://docweb.epagri.sc.gov.br/website\\_cepa/Fruticultura/2016/Relatorio\\_de\\_Projeto\\_%20Analise\\_Comparativa\\_LF\\_2015-16.pdf](http://docweb.epagri.sc.gov.br/website_cepa/Fruticultura/2016/Relatorio_de_Projeto_%20Analise_Comparativa_LF_2015-16.pdf)> Acessado em 01 de junho de 2018.

HAMAWAND, I., LEWIS, L., GHAF FOUR, N., & BUNDSCHUH, J. Desalination of salty water using vacuum spray dryer driven by solar energy. **Desalination**, v. 404, p. 182-191, 2017.

IMRE, L. Solar drying. In: MUJUNDAR, A.S. (Ed.) **Handbook of industrial drying**. 4<sup>th</sup> ed. Boca Raton: CRC Press. chap. 14, p.303-350, 2015.

PEREIRA, B. E. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, ed. 2, 2017. Disponível em: <[http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html)> Acessado em 30 de maio de 2018.

JANJAI, S.; BALA, B. K. Solar drying technology. **Food Engineering Reviews**, v. 4, n. 1, p. 16-54, 2012.

JAYA, S.; DAS, H. A vacuum drying model for mango pulp. **Drying technology**, v. 21, n. 7, p. 1215-1234, 2003.

JAYARAMAN, K. S.; GUPTA, D. K. **Handbook of Industrial Drying**. Cap. 25: Drying of Fruit and Vegetables. Editado por MUJUMDAR, A. S. Taylor & Francis Group, LLC, p. 612-633, 2014.

KALKMANN, M. L. Análise da incorporação tecnológica na agroindústria familiar no município de Crissiumal-RS. **Dissertação** (Mestrado em Economia) Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Crissiumal, RS, 2013.

KUMAR, M.; SANSANIWAL, S. K.; KHATAK, P. Progress in solar dryers for drying various commodities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 346-360, 2016.

LANGELAAN, H. C. et al. Technology options for feeding 10 billion people. Options for sustainable food processing. State of the art report. **Science and Technology Options Assessment**. Brussels: European Parliament, 2013. Disponível em: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2013/513533/IPOL-JOIN\\_ET\(2013\)513533\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2013/513533/IPOL-JOIN_ET(2013)513533_EN.pdf) Acessado em: 29 de janeiro de 2019.

LAURINDO, J. B.; PELEG, M. Mechanical measurements in puffed rice cakes. **Journal of texture studies**, v. 38, n. 5, p. 619-634, 2007.

LAURINDO, J. B.; PELEG, M. Mechanical characterization of shredded wheat. **Journal of texture studies**, v. 39, n. 5, p. 444-459, 2008.

LAURINDO, J.B., PORCIUNCULA, B.D.A.; ZOTARELLI, M.F. Processo de secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) para obtenção de alimentos desidratados crocantes. **Brazilian Patent** PI 017110000045, 2011.

LINK, J. V. **Aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo para a produção de fatias de manga (Mangífera indica L.) desidratadas**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

LINK, J.V.; TRIBUZI, G.; LAURINDO, J.B. Conductive multi-flash drying of mango slices: Vacuum pulse conditions on drying rate and product properties. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 2, 2018.

LINK, J.V.; TRIBUZI, G.; LAURINDO, J.B. Improving quality of dried fruits: A comparison between conductive multi-flash and traditional drying methods. **LWT-Food Science and Technology**, v. 84, p. 717-725, 2017.

LOUKA, N.; ALLAF, K. New process for texturizing partially dehydrated biological products using controlled sudden decompression to the vacuum: application on potatoes. **Journal of food science**, v. 67, n. 8, p. 3033-3038, 2002.

LOZANO, J.E., ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M.J. Total porosity and open-pore porosity in the drying of fruits. **Journal of Food Science**, v. 45, p. 1403–1407, 1980.

MADIOULI, J., LECOMTE, D., NGANYA, T., CHAVEZ, S., SGHAIER, J., SAMMOUDA, H. A method for determination of porosity change from shrinkage curves of deformable materials. **Drying Technology**, v. 25, p. 621-628, 2007.

MADIOULI, J., SGHAIER, J., LECOMTE, D., & SAMMOUDA, H., Determination of porosity change from shrinkage curves during drying of food material. **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 1, p. 43-51, 2012.

MASTRO, N. L. del; TAIPINA, M. S.; COHEN, V. H. Avaliação crítica da polpa de banana (*Musa spp.*) verde. **Higiene Alimentar**, 2007.

METHAKHUP, S.; CHIEWCHAN, N.; DEVAHASTIN S. Effects of drying methods and conditions on drying kinetics and quality of Indian gooseberry flake. **LWT-Food Science and Technology**, v. 38, n. 6, p. 579–587, 2005.

MEDINA, J.C.; BLEINROTH, E.W.; MARTIN, Z.J.; TRAVAGLINI, D.A.; OKADA, M.; QUAST, D.G.; HASHIZUME, T.; NETO, L. C. B.; ALMEIDA, L. A. S. B.; RENESTO, O.V.; MORETTI, V.A. **Banana: da**

**cultura, matéria-prima, processamento e aspectos econômicos.** 2° ed. Campinas(SP), ITAL, 1995, 302 p.

MESQUITA, L. C. S., **Eficiência de coletores solares e comparações entre tubos evacuados e coletores planos: Considerações teóricas e avaliação experimental.** Relatório técnico. 1ª ed. São Manuel (SP), Universidade do Sol, 2013.

MO, J. P. T. Design of solar energy system in food manufacturing environment. **Cogent Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1-16, 2016.

MONTEIRO, R.L. **Secagem de Batata-Doce em Micro-Ondas a Vácuo com Controle da Temperatura pela Manipulação da Potência.** Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.

MONTEIRO, R.L., CARCIOFI, B.A.M., LAURINDO, J.B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas, **Journal of Food Engineering**, v. 178, p. 1-11. 2016.

MONTEIRO, R. L., LINK, J. V., TRIBUZI, G., CARCIOFI, B. A., LAURINDO, J. B. Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices. **LWT – Food Science and Technology**, v. 96, p. 612-619, 2018.

MORRISON, G. L.; BUDIHardjo, I.; BEHNIA, M. Water-in-glass evacuated tube solar water heaters. **Solar energy**, v. 76, n. 1-3, p. 135-140, 2004.

MOTEVALI, A.; KOLOOR, R. T. A comparison between pollutants and greenhouse gas emissions from operation of different dryers based on energy consumption of power plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 445-461, 2017.

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**, 3 ed., Florida: CRC/Taylor & Francis, 2006.

MURTA, B. H. P.; ANDREANI, P.; CARCIOFI, B. A. M.; GIUSTINO TRIBUZI, MORAES, J.O.; PAUL, S. Challenges on developing an

acoustical measurement system for applications in food engineering. **Anais do 15º Congresso de Engenharia de Áudio da AES Brasil**, 2017.

OIKONOMOPOULOU, V. P.; KROKIDA, M. K.; KARATHANOS, V. T. The influence of freeze drying conditions on microstructural changes of food products. **Procedia food science**, v. 1, p. 647-654, 2011.

ORMENESE, C. S. C. R. **Obtenção de farinha de banana verde por diferentes processos de secagem e aplicação em produtos alimentícios**. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2010.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas. p.47-51, 2007.

PAYNE, F.A.; TARABA, J.L.; SAPUTRA, D. A review of puffing process for expansion of biological products. **Journal of Food Engineering**, v. 10, p. 183-197, 1989.

PELEG, M. On fundamental issues in texture evaluation and texturization – A view. **Food Hydrocolloids**, v. 20, n. 4, p. 405-414, 2006.

PIRASTEH, G.; SAIDUR, R.; RAHMAN, S. M. A.; RAHIM, N. A. A review on development of solar drying applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 133-148, 2014.

PORAT, R., LICHTER, A., TERRY, L. A., HARKER, R., & BUZBY, J. Postharvest losses of fruit and vegetables during retail and in consumers' homes: Quantifications, causes, and means of prevention. **Postharvest biology and technology**, 2018

PORCIUNCULA, B.D.A. **Desenvolvimento de processo integrado de desidratação e modificação da textura de banana (var. prata) por secagem convectiva e pulsos de vácuo**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2010.

PORCIUNCULA, B. D. A.; SEGURA, L. A.; LAURINDO, J. B. Processes for Controlling the Structure and Texture of Dehydrated Banana. **Drying Technology**, v. 34, p. 167-176, 2016.

PRAKASH, O.; KUMAR, A.. Solar greenhouse drying: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 905-910, 2014.

RATTI, C. (Ed.). **Advances in food dehydration**. CRC Press, 2008.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of food engineering**, v. 49, n. 4, p. 311-319, 2001.

REYES, A.; MAHN, A.; VÁSQUEZ, F. Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material. **Energy Conversion and Management**, v. 83, p. 241-248, 2014.

SHARMA, A., CHEN, C.R., LAN, N. V. Solar-energy drying systems: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 1185-1210, 2009.

SAGAR, V. R.; KUMAR, P. S. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of food science and technology**, v. 47, n. 1, p. 15-26, 2010.

SEBRAE. **Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas**. Estudo de Mercado. Banana relatório completo, 2008. Disponível em: <[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS\\_CHRONUS/bds/bds.nsf/8E2336FF6093AD96832574DC0045023C/\\$File/NT0003904A.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/8E2336FF6093AD96832574DC0045023C/$File/NT0003904A.pdf)>. Acessado em: 03 de junho de 2018.

SERENO A. M.; SILVA M.A.; MAYOR, L. Determination of particle density and porosity in foods and porous materials with high moisture content. **International Journal of Food Properties**, v.10, p.455-469, 2007.

SILVA, R. M. Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, Fevereiro/2015 (Texto para Discussão nº 166). Disponível em: [www.senado.leg.br/estudos](http://www.senado.leg.br/estudos). Acesso em 6 de fevereiro de 2019.

SULLIVAN, J.F.; CRAIG, J.C.JR. The development of explosion puffing. **Food Technology**, v.38, p. 52-58, 1984.

ŠUMIC, Z.; TEPIĆ, A.; VIDOVIĆ, S.; JOKIĆ, S.; MALBAŠA, R. Optimization of frozen sour cherries vacuum drying process. **Food Chemistry**, v. 136, p. 55–63, 2013.

THIRUGNANASAMBANDAM, M.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar thermal technologies. **Renewable and sustainable energy reviews**, v.14, n.1, p.312-322, 2010.

TIWARI, A. A Review on Solar Drying of Agricultural Produce. **Journal of Food Process & Technology**, v. 7, p. 1-12, 2016.

TOREZAN, G. A. P. **Desenvolvimento do Processo Combinado de Desidratação Osmótica-Fritura para Obtenção de Chips de Manga**, 2005, 291p, (Tese de Doutorado). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

VARNALIS, A. I.; BRENNAN, J. G.; MACDOUGALL, D. B. A proposed mechanism of high-temperature puffing of potato. Part I. The influence of blanching and drying conditions on the volume of puffed cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 361–367, 2001.

VEGA-MERCADO, H., GÓNGORA-NIETO, M., BARBOSA-CÁNOVAS, G. Advances in dehydration of foods. **Journal of Food Engineering**, v.49, p. 271–289, 2001.

VISAVALÉ, G. L. Principles, classification and selection of solar dryers. In: Hii, C. L.; Ong, S. P.; Jangam, S. V.; Mujumdar, A.S. (Editores). **Solar drying: Fundamentals, Applications and Innovations**, Singapura, 2012, p. 1-50.

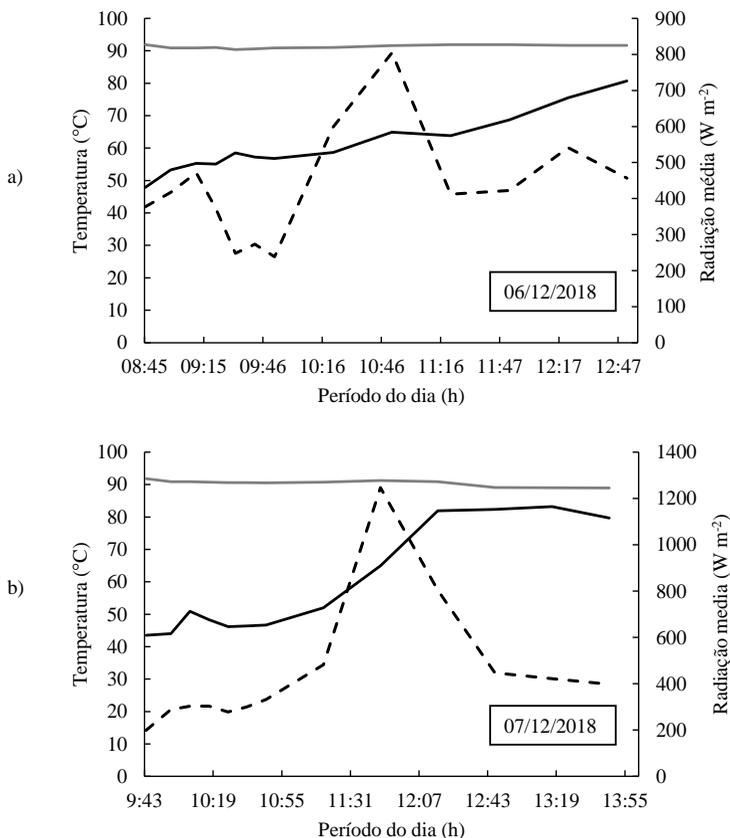
YAHYA, M.; FUDHOLI, A.; SOPIAN, K. Energy and exergy analyses of solar-assisted fluidized bed drying integrated with biomass furnace. **Renewable Energy**, v. 105, p. 22-29, 2017.

ZOTARELLI, M. F., PORCIUNCULA, B. D. A., LAURINDO, J. B., A convective multi-flash drying process for producing dehydrated crispy fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 108, n. 4, p. 523-531, 2012.

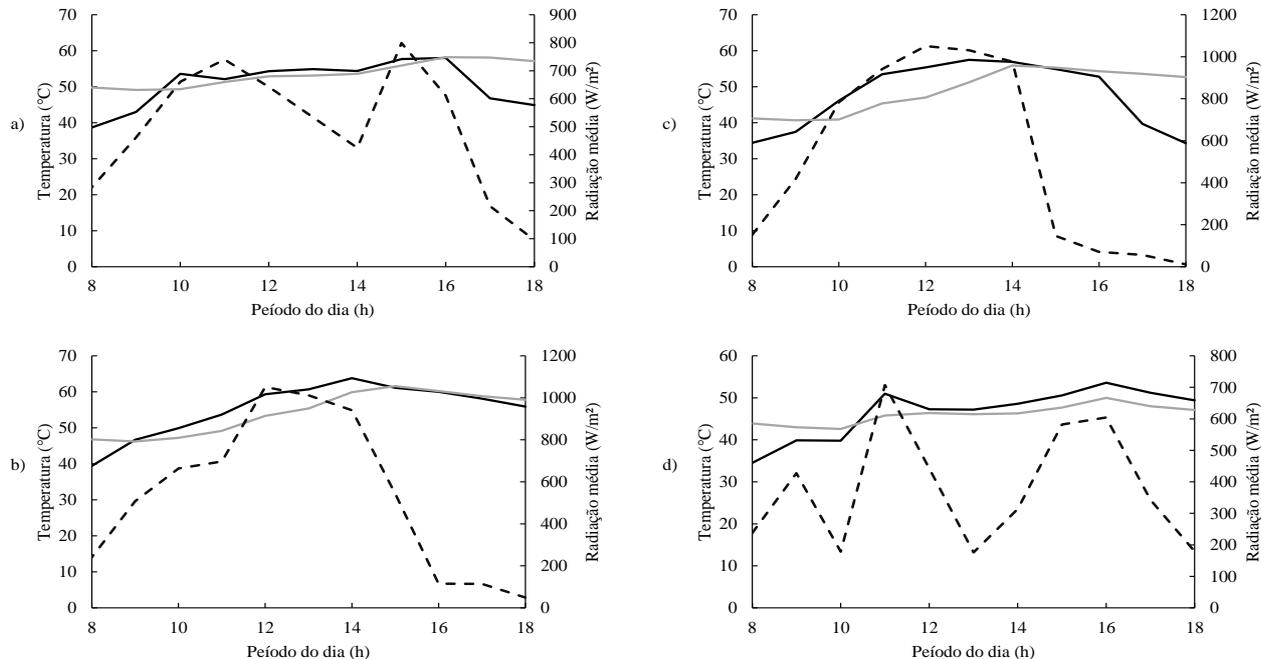


**APÊNDICE A** – Evolução da radiação solar média, temperatura da água no interior do coletor solar e do tanque de água

**Figura A.1** – Evolução temporal da radiação solar média (---), temperatura da água no interior do coletor solar (—) e temperatura da água no interior do tanque (—) durante os experimentos de secagem. a) KMFDVD (5,9 mbar s<sup>-1</sup>); b) KMFDVD (9,8 mbar s<sup>-1</sup>).



**Figura A.2** – Evolução temporal da radiação solar média (---), temperatura da água no interior do coletor solar (—) e temperatura da água no interior do tanque (—) durante diferentes dias de janeiro. a) Dia 14/01/19; b) Dia 15/01/2019; c) Dia 17/01/2019; d) Dia 18/01/2019.



**Tabela A.1** – Dados da temperatura da água medida em diferentes partes do sistema, temperatura ambiente e radiação solar nos diferentes dias avaliados.

		Temperatura da água (°C)		Temperatura ambiente (°C)		Radiação Global Média (W/m <sup>2</sup> )
		Tanque	Coletor solar	Interna	Externa	
	<b>Média</b>	53,2	49,7	27,4	29,6	460,6
<b>14/01/19</b>	<b>Máxima</b>	58,2	58,0	28,9	32,3	799,2
	<b>Média</b>	53,6	53,7	27,9	30,8	498,8
<b>15/01/19</b>	<b>Máxima</b>	61,6	63,8	28,7	34,6	1052
	<b>Média</b>	48,9	47,5	26,0	29,8	512,6
<b>17/01/19</b>	<b>Máxima</b>	55,9	57,5	28,4	32,6	1051,0
	<b>Média</b>	46,1	46,6	25,5	28,7	407,7
<b>18/01/19</b>	<b>Máxima</b>	50,0	53,6	26,6	32,0	707,2

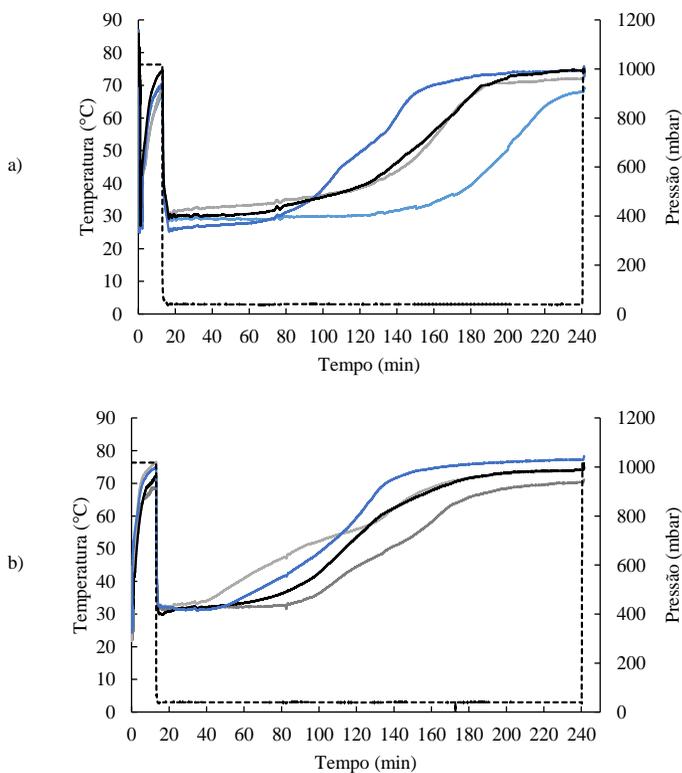
**APÊNDICE B** – Caracterização físico-química das amostras de banana prata *in natura* utilizada em cada processo de secagem.

<b>Processo de secagem</b>	$X_{bs}$ (g g <sup>-1</sup> )	$a_w$	SST (°brix)
KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> )	2,134 ± 0,064 <sup>ab</sup>	0,974 ± 0,003 <sup>a</sup>	25,1 ± 0,5 <sup>a</sup>
KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> )	2,230 ± 0,129 <sup>ac</sup>	0,975 ± 0,003 <sup>a</sup>	25,5 ± 0,8 <sup>a</sup>
KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> )	2,209 ± 0,033 <sup>ab</sup>	0,974 ± 0,001 <sup>a</sup>	24,7 ± 0,8 <sup>a</sup>
KMFDVD (9,8 mbar s <sup>-1</sup> )	2,184 ± 0,100 <sup>abc</sup>	0,974 ± 0,003 <sup>a</sup>	25,1 ± 0,9 <sup>a</sup>
KMFDVD (19,9 (mbar s <sup>-1</sup> )	2,244 ± 0,07 <sup>b</sup>	0,975 ± 0,002 <sup>a</sup>	24,9 ± 0,8 <sup>a</sup>
KMFDVD_SOLAR	2,094 ± 0,136 <sup>c</sup>	0,978 ± 0,006 <sup>a</sup>	25,4 ± 0,8 <sup>a</sup>

\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

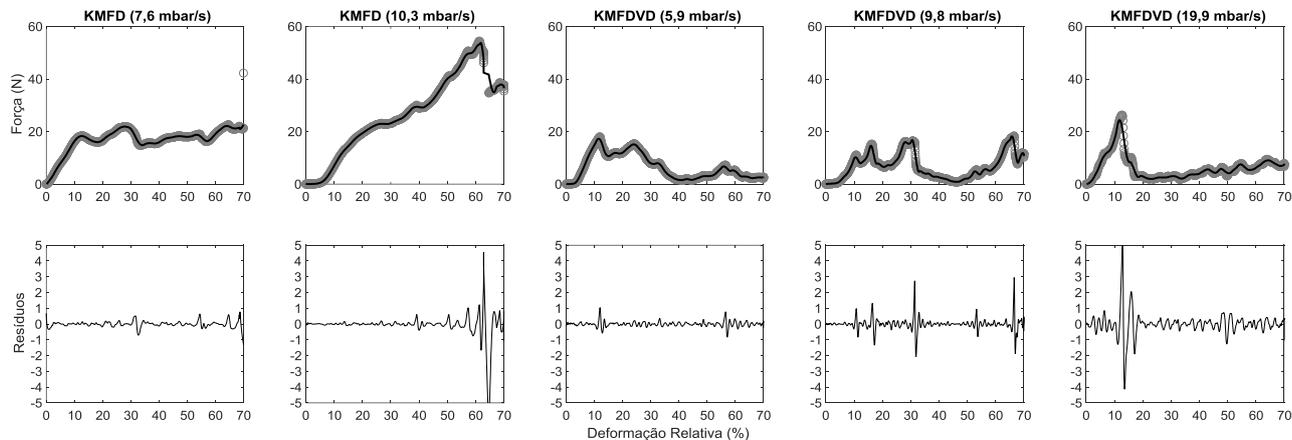
**APÊNDICE C** - Evolução temporal da temperatura do interior das amostras e da pressão do sistema durante as secagens.

**Figura C.1** – Evolução temporal da temperatura do interior das amostras (—) e da pressão (---) por a) KMFDVD ( $5,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ) e b) KMFDVD ( $19,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ).

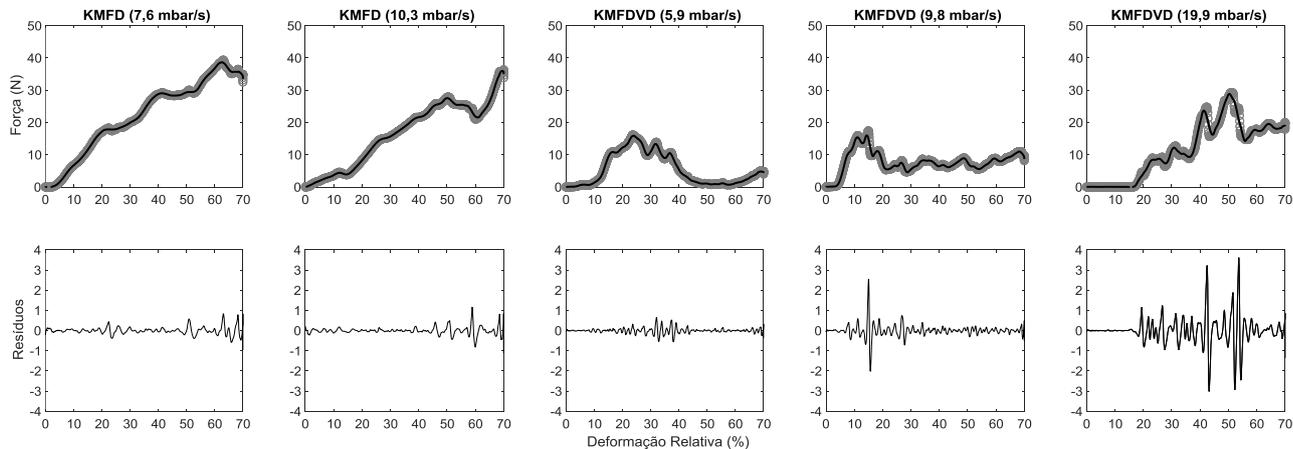


**APÊNDICE D** – Gráficos representativos da oscilação da força em função da deformação dos testes de penetração das amostras de banana desidratadas por diferentes métodos de secagem.

**Figura D.1** – Segunda replicata das curvas de oscilação da força em função da deformação. Linha superior: Dados de força-deformação ( $\circ$ ) e ajuste não-paramétrico ( $\text{—}$ ); Linha inferior: curvas dos resíduos.

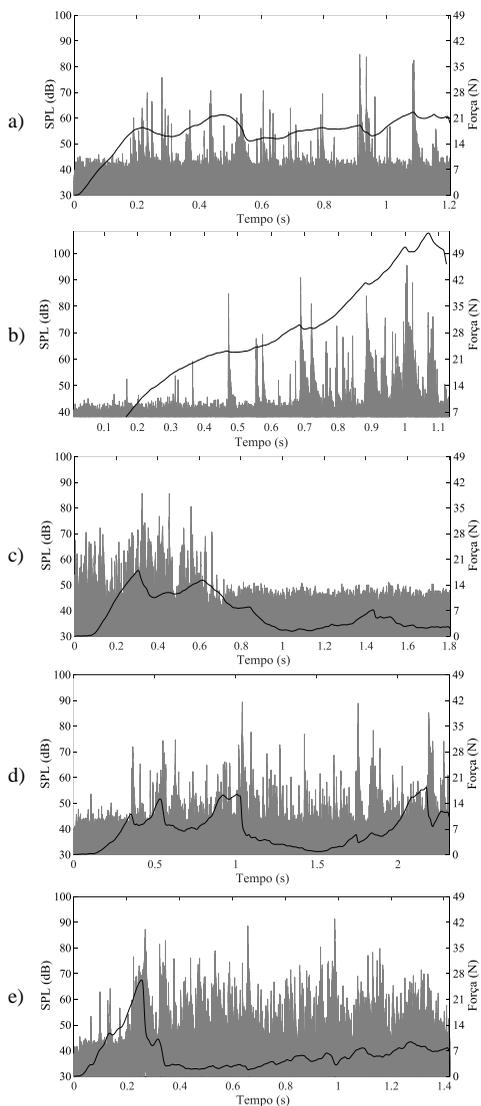


**Figura D.2** – Terceira replicata das curvas de oscilação da força em função da deformação. Linha superior: Dados de força-deformação ( $\circ$ ) e ajuste não-paramétrico ( $\text{—}$ ); Linha inferior: curvas dos resíduos.

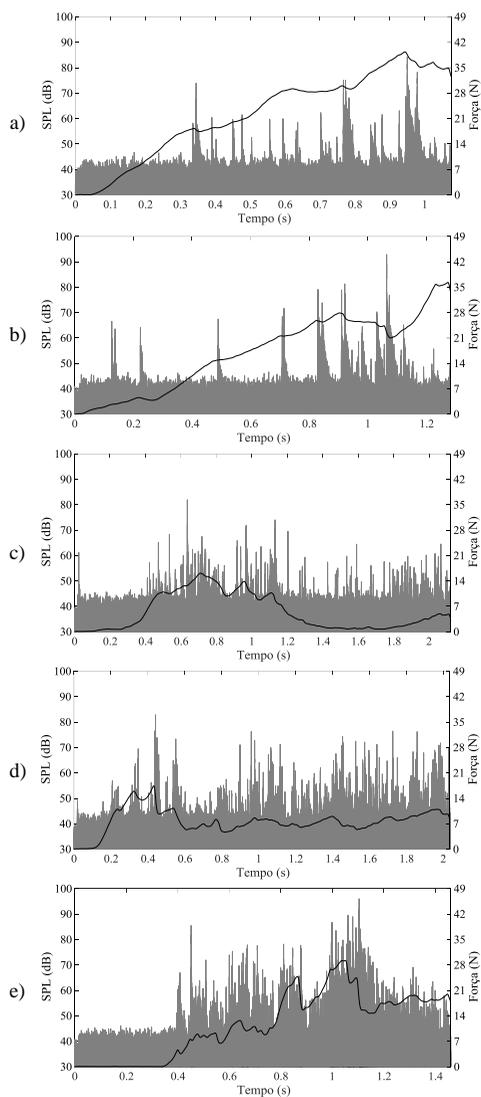


**APÊNDICE E** – Evolução da força aplicada (—) e nível de pressão sonora (spl) (—) versus o tempo de penetração das amostras

**Figura E.1** – Segunda replicata. a) KMFD (7,6 mbar s<sup>-1</sup>); b) KMFD (10,3 mbar s<sup>-1</sup>); c) KMFDVD (5,9 mbar s<sup>-1</sup>); d) KMFDVD (9,8 mbar s<sup>-1</sup>); e) KMFDVD (19,9 mbar s<sup>-1</sup>).



**Figura E.2**– Terceira replicata. a) KMFD ( $7,6 \text{ mbar s}^{-1}$ ); b) KMFD ( $10,3 \text{ mbar s}^{-1}$ ); c) KMFDVD ( $5,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ); d) KMFDV ( $9,8 \text{ mbar s}^{-1}$ ); e) KMFDVD ( $19,9 \text{ mbar s}^{-1}$ ).



**APÊNDICE F** – Valores médios e desvios padrões dos parâmetros obtidos nos testes acústico-mecânico, para amostras secas pelos diferentes processos de secagem, para a análise estatística  $p \leq 0,1$ .

Processo de secagem	Parâmetros instrumentais mecânicos			Parâmetros instrumentais acústicos		
	Área (N.mm)	Número de picos de força	Força máxima (N)	$SPL_{10}$ (dB)	$SPL_{máx}$ (dB)	Número de picos acústicos
KMFD (7,6 mbar s <sup>-1</sup> )	1494,9 ± 725,9 <sup>a*</sup>	8 ± 3 <sup>a</sup>	38,2 ± 18,3 <sup>a</sup>	79,0 ± 5,1 <sup>a</sup>	85,7 ± 5,8 <sup>a</sup>	887 ± 706 <sup>a</sup>
KMFD (10,3 mbar s <sup>-1</sup> )	1451,4 ± 918,8 <sup>a</sup>	7 ± 2 <sup>a</sup>	41,6 ± 20,8 <sup>a</sup>	80,1 ± 7,9 <sup>a</sup>	87,4 ± 8,8 <sup>a</sup>	616 ± 349 <sup>ab</sup>
KMFDVD (5,9 mbar s <sup>-1</sup> )	487,0 ± 139,3 <sup>b</sup>	18 ± 5 <sup>b</sup>	17,1 ± 7,8 <sup>b</sup>	83,8 ± 6,3 <sup>a</sup>	89,4 ± 7,1 <sup>a</sup>	2082 ± 1352 <sup>c</sup>
KMFDVD (9,8 mbar s <sup>-1</sup> )	429,4 ± 144,3 <sup>b</sup>	18 ± 4 <sup>b</sup>	14,2 ± 6,7 <sup>b</sup>	79,8 ± 5,1 <sup>a</sup>	84,6 ± 6,3 <sup>a</sup>	1637 ± 606 <sup>bc</sup>
KMFDVD (19,9 mbar s <sup>-1</sup> )	722,1 ± 408,0 <sup>b</sup>	21 ± 6 <sup>b</sup>	27,5 ± 13,5 <sup>ab</sup>	85,3 ± 8,3 <sup>a</sup>	89,7 ± 9,4 <sup>a</sup>	3047 ± 1623 <sup>d</sup>

\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

